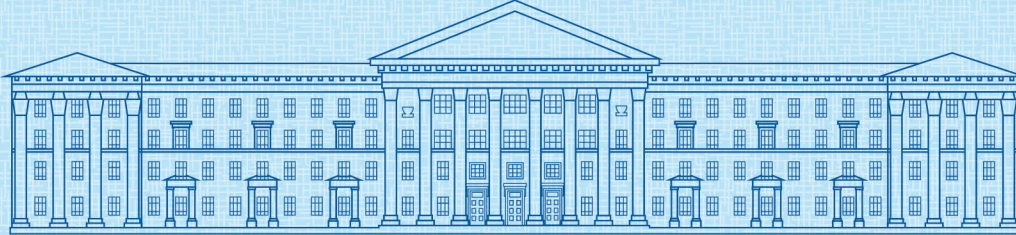




ISSN 2307-3489 (Print)
ISSN 2307-6666 (Online)



НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО
УНІВЕРСИТЕТУ ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ
ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

№ 3(87)

•• 2020 ••

Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Науковий журнал

№ 3 (87) 2020

Виходить 6 разів на рік ♦ ♦ ♦ ♦ ♦ Заснований у серпні 2003 р.

Автоматизовані та телематичні системи на транспорті
Екологія та промислова безпека
Економіка та управління
Експлуатація та ремонт засобів транспорту
Електричний транспорт, енергетичні системи та комплекси
Залізнична колія та автомобільні дороги
Інформаційно-комунікаційні технології та математичне моделювання
Матеріалознавство
Машинобудування
Рухомий склад і тяга поїздів
Транспортне будівництво

Дніпро

2020

Засновник:
ДНІПРОВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

ГОЛОВА РЕДАКЦІЙНОЇ РАДИ УНІВЕРСИТЕТУ
ГОЛОВНИЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛУ

Пшінько О. М., доктор технічних наук
Пічугов С. О., доктор фізико–математичних наук

ЗАСТУПНИК ГОЛОВНОГО РЕДАКТОРА
ВІДПОВІДАЛЬНИЙ СЕКРЕТАР

Козаченко Д. М., доктор технічних наук
Колесникова Т. О., кандидат наук
із соціальних комунікацій

ЧЛЕНИ РЕДАКЦІЙНОЇ КОЛЕГІЇ:

Аврамовіс З. З., Белградський університет (Сербія); Бела І., Інститут логістики (Угорщина); Біляєв М. М., ДНУЗТ (Україна); Бобровський В. І., ДНУЗТ (Україна); Богдявічус М., Вільнюський технічний університет імені Гедимінаса (Литва); Боднар Б. Є., ДНУЗТ (Україна); Бондаренко І. О., ДНУЗТ (Україна); Вакуленко І. О., ДНУЗТ (Україна); Воронін С. В., УкрДУЗТ (Україна); Головова Л. С., ДНУЗТ (Україна); Єфременко В. Г., Приазовський державний технічний університет (Україна); Жуковицький І. В., ДНУЗТ (Україна); Калівода Я., Чеський технічний університет (Чехія); Капіца М. І., ДНУЗТ (Україна); Капустян В. О., НТТУ «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» (Україна); Кершіс Р., Каунаський технологічний університет (Литва); Кузнєцов В. Г., Науково-дослідний інститут залізниць (Польща); Манашкин Л., Незалежний вчений (США); Марущак П. О., Тернопільський національний технічний університет імені Івана Пулюя (Україна); Піттман Р., Антимонопольний відділ Департаменту юстиції (США); Ракша С. В., ДНУЗТ (Україна); Сладковскі А., Сілезький технологічний університет (Польща); Суглер Дж., Варшавська школа економіки (Польща); Тютюкін О. Л., ДНУЗТ (Україна); Шинкаренко В. І., ДНУЗТ (Україна).

Журнал зареєстровано Державною реєстраційною службою Міністерства юстиції України. Свідоцтво про реєстрацію КВ № 19609-9409ПР від 29.12.2012 р. Видання внесено до Переліку наукових фахових видань України наказом Міністерства освіти і науки України 29.12.2014 р. № 1528 (технічні науки). Журнал зареєстровано: в міжнародних каталогах періодичних видань Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; наукометричних системах Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus та ін. Друкується за рішенням вченої ради університету від 02.07.2020 р., протокол № 10

Видавець Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна (м. Дніпро) Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 1315 від 31.03.2003 р.

Адреса засновника та редакції вул. Лазаряна, 2, кім. 267, Дніпро, Україна, 49010 тел.: +38 (056) 371-51-05; e-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua; сайт журналу: <http://stp.diit.edu.ua/>

Видання публікується з 1936 р.:

- 1936–1993 рр. – «Труди Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта»;
- 1993–2002 рр. – «Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту» (за серіями);
- 2003–2012 рр. – «Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна», (ISSN 1993-9175);
- з 2013 р. – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта
имени академика В. Лазаряна

НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ

ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА

Научный журнал

№ 3 (87) 2020

Выходит 6 раз в год ♦ ♦ ♦ ♦ ♦ Основан в августе 2003 г.

Автоматизированные и телематические системы на транспорте
Экология и промышленная безопасность
Экономика и управление
Эксплуатация и ремонт средств транспорта
Электрический транспорт, энергетические системы и комплексы
Железнодорожный путь и автомобильные дороги
Информационно-коммуникационные технологии и математическое моделирование
Материаловедение
Машиностроение
Подвижной состав и тяга поездов
Транспортное строительство

Днепро

2020

Учредитель:
ДНИПРОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА ИМЕНИ АКАДЕМИКА В. ЛАЗАРЯНА

*ПРЕДСЕДАТЕЛЬ РЕДАКЦИОННОГО
СОВЕТА УНИВЕРСИТЕТА*

Пшинько А. Н., доктор технических наук

ГЛАВНЫЙ РЕДАКТОР ЖУРНАЛА

Пичугов С. А., доктор физико-математических наук

ЗАМЕСТИТЕЛЬ ГЛАВНОГО РЕДАКТОРА

Козаченко Д. Н., доктор технических наук

ОТВЕТСТВЕННЫЙ СЕКРЕТАРЬ

Колесникова Т. А., кандидат наук
по социальным коммуникациям

ЧЛЕНЫ РЕДАКЦИОННОЙ КОЛЛЕГИИ:

Аврамовис З. З., Белградский университет (Сербия); Бела И., Институт логистики (Венгрия); Беляев Н. Н., ДНУЖТ (Украина); Бобровский В. И., ДНУЖТ (Украина); Богдявичус М., Вильнюсский технический университет имени Гедиминаса (Литва); Боднар Б. Е., ДНУЖТ (Украина); Бондаренко И. А., ДНУЖТ (Украина); Вакуленко И. А., ДНУЖТ (Украина); Воронин С. В., УкрГУЖТ (Украина); Головкова Л. С., ДНУЖТ (Украина); Ефременко В. Г., Приазовский государственный технический университет (Украина); Жуковицкий И. В., ДНУЖТ (Украина); Каливода Я., Чешский технический университет в Праге (Чехия); Капица М. И., ДНУЖТ (Украина); Капустян В. Е., Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского» (Украина); Кершис Р., Каунасский технологический университет (Литва); Кузнецов В. Г., Научно-исследовательский институт железных дорог, (Польша); Манашкин Л., Независимый ученый, (США); Марущак П. А., Тернопольский национальный технический университет имени Ивана Пулюя (Украина); Питтман Р., Антимонопольный отдел Департамента юстиции (США); Ракша С. В., ДНУЖТ (Украина); Сладковски А., Силезский технологический университет, (Польша); Суглер Дж., Варшавская школа экономики (Польша); Тютюкин А. Л., ДНУЖТ (Украина); Шинкаренко В. И., ДНУЖТ (Украина)

Журнал
зарегистрирован

Государственной регистрационной службой Министерства юстиции Украины.
Свидетельство о регистрации КВ № 19609-9409ПР от 29.12.2012 г.

Издание внесено в Перечень научных специализированных изданий Украины приказом Министерства образования и науки Украины 29.12.2014 г. № 1528 (технические науки).

Журнал зарегистрирован: в международных каталогах периодических изданий Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; наукометрических системах Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus и др.

Печатается по решению ученого совета университета от 02.07.2020 г., протокол № 10

Издатель

Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна (г. Днепро)

Свидетельство субъекта издательского дела ДК № 1315 от 31.03.2003 г.

Адрес
учредителя

ул. Лазаряна, 2, ком. 267, Днепро, Украина, 49010, тел.: +38 (056) 371-51-05;
e-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua; сайт журнала: <http://stp.diit.edu.ua/>

Издание публикуется с 1936 г.:

1936–1993 гг. – «Труды Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта»;

1993–2002 гг. – «Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту» (за серіями);

2003–2012 гг. – «Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна», (ISSN 1993-9175);

с 2013 г. – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»

Dnipro National University of Railway Transport
named after Academician V. Lazaryan

NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU
VÌSNIK DNÌPROPETROVS'KOGO NACIONAL'NOGO UNÌVERSITETU
ZALÌZNIČNOGO TRANSPORTU
=
SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

Scientific journal

No. 3 (87) 2020

Bi-Monthly ♦ ♦ ♦ ♦ ♦ Founded in August 2003

Automated and Telematic Systems on Transport
Ecology and Industrial Safety
Economics and Management
Operation and Repair of Transport Means
Electric Transport, Power Systems and Complexes
Railroad and Roadway Network
Information and Communication Technologies and Mathematical Modelling
Material Science
Mechanical Engineering
Rolling Stock and Train Traction
Transport Construction

Dnipro

2020

Founder:

DNIPRO NATIONAL UNIVERSITY OF RAILWAY TRANSPORT
NAMED AFTER ACADEMICIAN V. LAZARYAN

Chairman of the Editorial Board of the University	Pshinko O. M., Doctor of Technical Sciences
Editor-in-Chief	Pichugov, S. A., Doctor of Physics and Mathematics
Deputy Chief Editor	Kozachenko D. M., Doctor of Technical Sciences
Executive Secretary	Kolesnykova T. O., PhD of Social Communications

EDITORIAL BOARD MEMBERS:

Avramovic Z. Ž., Faculty of Transport and Traffic Engineering (Serbia); Béla I., Logistics Institute (Hungary); Biliaiev M. M., DNURT (Ukraine); Bobrovskiy, V. I., DNURT (Ukraine); Bodnar B. E., DNURT (Ukraine); Bogdevičius M., Vilniaus Gedimino technikos universitetas (Lithuania); Bondarenko I. O., DNURT (Ukraine); Cygler J., Szkoła Główna Handlowa w Warszawie (Poland); Efremenko V. G., Priazovsky State Technical University (Ukraine); Golovkova L. S., DNURT (Ukraine); Kalivoda J., Czech Technical University in Prague (Czech Republic); Kapitsa M. I., DNURT (Ukraine); Kapustyan V. O., National Technical University of Ukraine «Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute», (Ukraine); Kersys R., Kaunas University of Technology (Lithuania); Kuznetsov V. G., The Railway Research Institute, (Poland); Manashkin L., Self-Employed (USA); Maruschak P. O., Ternopil Ivan Puluj National Technical University (Ukraine); Pittman R., Antitrust Division of the USA. Department of Justice (USA); Raksha S. V., DNURT (Ukraine); Shinkarenko V. I., DNURT (Ukraine); Śladkowski A., Politechnika Slaska w Gliwicach (Poland); Tiutkin O. L., DNURT (Ukraine); Vakulenko I. O., DNURT (Ukraine); Voronin S. V., UkrSURT (Ukraine); Zhukovitskiy I. V., DNURT (Ukraine)

Journal was registered	by the State Registration Service of the Ministry of Justice of Ukraine. Certificate of Registration KB no.19609-9409PR from 29.12.2012 Edition is included in the list of scientific professional publications of Ukraine by the Order of the Ministry of Education and Science of Ukraine 29.12.2014 r. no. 1528 (technical sciences). Journal is registered: in the International Catalogue of periodicals Ulrichsweb™ Global Serials Directory, OCLC WorldCat; research and metric systems Google Scholar, DOAJ, Index Copernicus, etc. Published according to the Academic Council decision of the University from 02.07.2020, Protocol no. 10
Publisher	Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan (Dnipro) Certificate of Publisher ДК no. 1315 from 31.03.2003
Address of Founder	St. Lazaryana, 2, room 267, Dnipro, Ukraine, 49010, tel.: +38 (056) 371-51-05; e-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua; journal site: http://stp.diit.edu.ua/

Edition is being published since 1936:

- 1936–1993 – «Труды Днепропетровского института инженеров железнодорожного транспорта»;
- 1993–2002 – «Збірник наукових праць Дніпропетровського державного технічного університету залізничного транспорту» (за серіями);
- 2003–2012 – «Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна», (ISSN 1993-9175),
- since 2013 – «Наука та прогрес транспорту. Вісник Дніпропетровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна»

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

UDC 504.5:614.84.027.1

M. M. BILIAIEV^{1*}, O. V. BERLOV^{2*}, V. V. BILIAIEVA^{3*}, V. A. KOZACHYNA^{4*},
I. V. KALASHNIKOV^{5*}

^{1*}Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{2*}Dep. «Life Safety», Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevskoho St., 24a, Dnipro, Ukraine, 49600, tel. +38 (056) 756-34-57, e-mail berlov@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

^{3*}Dep. «Fluid Dynamics, Energy and Mass Transfer», Oles Honchar Dnipro National University, Haharina Av., 72, Dnipro, Ukraine, 49000, tel. +38 (056) 374 98 22, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0003-2399-3124

^{4*}Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

^{5*}Kharkiv Branch Office «Design and Research Institute of Railway Transport» of the Ukrainian Railway PJSC, Kotliara St., 7, Kharkiv, 61052, tel. +38 (057) 724 41 25, e-mail uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380

EMERGENCY BURNING OF SOLID ROCKET PROPELLANT: DAMAGE RISK ASSESSMENT TO PEOPLE IN THE WORKPLACE

Purpose. This work includes the development of a computer model to calculate the risk of thermal damage to people in the shop in case of emergency burning of solid rocket propellant. **Methodology.** To calculate the temperature field in the shop in order to determine the zones of thermal damage to workers in the building, the equation expressing the law of energy conservation was used. Based on this modeling equation, the temperature field in the shop is calculated in the presence of a source of heat emission – burning solid rocket propellant. To calculate the velocity field of air flow in the shop, taking into account the location of obstacles in the path of heat wave propagation, we used the model of vortex-free air motion – the equation of the velocity potential. A two-step finite difference scheme of conditional approximation is used to numerically solve the equation for the velocity potential. A difference splitting scheme was used to numerically solve the energy equation. At the first stage of construction of the difference splitting scheme of the two-dimensional energy equation into the system of one-dimensional equations is performed. Each one-dimensional equation allows you to calculate the temperature change in one coordinate direction. The point-to-point computation scheme is used to determine the temperature. When conducting a computational experiment, the air exchange in the building is taken into account. The risk assessment of thermal damage to personnel in the building is performed for different probabilities of the place of emergency combustion of solid rocket propellant. **Findings.** Using numerical model prediction of the potential risk areas of thermal damage to staff in the shop for a variety of emergency situations was performed. **Originality.** A computer model for rapid assessment of the potential risk of damage to people in the shop in case of emergency burning of solid rocket propellant was constructed. **Practical value.** The authors developed a code that allows you to quickly simulate the temperature fields formation in the shop in case of emergency burning of solid rocket propellant and to identify potential areas of thermal damages to workers based on this information. The developed computer program can be used to assess the risk of thermal damage in the chemical industry in case of emergency.

Keywords: numerical modeling; risk of damage; emergency burning of solid rocket propellant; thermal pollution of air

Introduction

Particularly dangerous are industrial sites, where emergencies are possible with the sudden formation of intense, diverse impact factors (shock wave, heat wave, emission of toxic substances). In this case, it is extremely important to predict the risk of damage to personnel in the workplace during emergencies.

Analytical and numerical forecasting methods are used to determine the risk of personnel damage in case of emergencies [3, 6–15]. These methods are focused on assessing the risk of toxic damage to humans during accidental releases of toxic substances. At the same time, the task of predicting the risk of thermal damage to people during emergencies is also relevant. This is especially important in cases where there is a fire inside industrial shops with a significant number of workers. The risk of thermal damage may occur, for example, in the event of emergency ignition of solid rocket propellant in the shops. The temperature of the combustion products of solid rocket propellants is very high. Due to the high emission of heated propellant combustion products, the area of thermal contamination spreads across the shop and there is a risk of thermal damage to personnel in the work areas. To assess the risk of thermal damage to personnel, it is necessary to have mathematical models.

Purpose



Fig. 1. Solid propellant engine of Thunder-2 rocket in the working room
(<https://allkharkov.ua/news/state/grom-griagnet-v-etom-gody.html>)

The paper envisages the development of a numerical model for assessing the risk of thermal damage to people in the workplace in the event of emergency burning of solid rocket propellant (SRP) for Thunder-2 rocket (Fig. 1).

Methodology

To assess the risk of thermal damage to people in the workplace in the event of emergency burning of solid rocket propellant, we will use the equation of convective heat transfer (two-dimensional, planned model, Boussinesq approximation) [4, 7]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} + \frac{\partial vT}{\partial y} = \text{div}(a \text{grad} T), \quad (1)$$

where T – is the air temperature; u, v – components of the air velocity vector in the building; $a = (a_x, a_y)$ – temperature conductivity coefficients; x_i, y_i – Cartesian coordinates; t – time.

Statement of boundary conditions for energy equation (1) is as follows [7]:

1. At the entrance to the calculation area:

$$T = T_{in},$$

where T_{in} – known air temperature (for example, $T_{in} = 20^\circ \text{C}$).

2. At the boundary of the outflow of the calculation area:

$$T_{i+1,j} = T_{i,j},$$

where $T_{i+1,j}$ – temperature in the last difference cell; $T_{i,j}$ – the temperature in the previous cell.

3. On the hard boundaries $\frac{\partial T}{\partial n} = 0$.

For the moment of time $t = 0$, i.e. at the beginning of the calculation, we set the condition $T = T_0$, where T_0 is the known air temperature in the calculation area, for example $T_0 = T_{in}$. The temperature of burning products is set at the place of solid propellant combustion [7].

By solving equation (1) we can determine the temperature distribution in the working areas in the shop. The important thing is that one can obtain a non-steady solution to the problem – the data of changes in the temperature distribution in the shop over time. The risk of thermal damage [7] is determined from the following condition: if the air temperature in the working area is more than 100°C , at which there is a complete protein denaturation, then at this point in the working area it is assumed that the risk of damage is 100 %.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

To numerically solve equation (1), we split the energy equation at the differential level into a sequence of such equations [5, 7]:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial uT}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(a_x \frac{\partial T}{\partial x} \right); \quad (2)$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial vT}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left(a_y \frac{\partial T}{\partial y} \right). \quad (3)$$

Next, we use a non-explicit difference scheme to numerically integrate one-dimensional energy equations [5, 7]. Let us perform the following transformations:

$$\frac{\partial uT}{\partial x} = \frac{\partial u^+T}{\partial x} + \frac{\partial u^-T}{\partial x};$$

$$\frac{\partial vT}{\partial y} = \frac{\partial v^+T}{\partial y} + \frac{\partial v^-T}{\partial y};$$

$$u^+ = \frac{u + |u|}{2}; \quad u^- = \frac{u - |u|}{2};$$

$$v^+ = \frac{v + |v|}{2}; \quad v^- = \frac{v - |v|}{2}.$$

Let us perform further approximation of derivatives for equations from system (2), (3) [7]:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x} \left(a_x \frac{\partial T}{\partial x} \right) &\approx a_x \frac{T_{i+1,j}^{n+1} - T_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} - \\ &- a_x \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x^2} = M_{xx}^- T^{n+1} + M_{xx}^+ T^{n+1}; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial y} \left(a_y \frac{\partial T}{\partial y} \right) &\approx a_y \frac{T_{i,j+1}^{n+1} - T_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} - \\ &- a_y \frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y^2} = M_{yy}^- T^{n+1} + M_{yy}^+ T^{n+1}; \end{aligned}$$

$$\frac{\partial u^+T}{\partial x} \approx \frac{u_{i+1,j}^+ T_{i,j}^{n+1} - u_{i,j}^+ T_{i-1,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^+ T^{n+1};$$

$$\frac{\partial u^-T}{\partial x} \approx \frac{u_{i-1,j}^- T_{i+1,j}^{n+1} - u_{i,j}^- T_{i,j}^{n+1}}{\Delta x} = L_x^- T^{n+1};$$

$$\frac{\partial v^+T}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j+1}^+ T_{i,j}^{n+1} - v_{i,j}^+ T_{i,j-1}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^+ T^{n+1};$$

$$\frac{\partial v^-T}{\partial y} \approx \frac{v_{i,j-1}^- T_{i,j+1}^{n+1} - v_{i,j}^- T_{i,j}^{n+1}}{\Delta y} = L_y^- T^{n+1}.$$

The splitting scheme for equation (2) is written as follows [5, 7]:

– in the first step, the difference equation has the form:

$$\frac{T_{i,j}^k - T_{i,j}^n}{\Delta t} + L_x^+ T^k = M_{xx}^+ T^k + M_{xx}^- T^n; \quad (4)$$

– in the second step, the difference equation takes the form:

$$\frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^k}{\Delta t} + L_x^- T^{n+1} = M_{xx}^+ T^n + M_{xx}^- T^{n+1}. \quad (5)$$

The splitting scheme for numerical integration of equation (3) will be as follows:

– in the first step we obtain the difference equation:

$$\frac{T_{i,j}^k - T_{i,j}^n}{\Delta t} + L_y^+ T^k = M_{yy}^+ T^k + M_{yy}^- T^n; \quad (6)$$

– in the second step of splitting, the difference equation will have the form:

$$\frac{T_{i,j}^{n+1} - T_{i,j}^k}{\Delta t} + L_y^- T^{n+1} = M_{yy}^+ T^n + M_{yy}^- T^{n+1}. \quad (7)$$

The unknown value of temperature T at each splitting step (4) – (7) is calculated by the formula of the point-to-point computation.

The air velocity field u, v , in the presence of obstacles at the industrial site, is determined based on the model of the movement potential [2, 3, 7]:

$$\frac{\partial^2 P}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 P}{\partial y^2} = 0; \quad (8)$$

$$u = \frac{\partial P}{\partial x}; \quad v = \frac{\partial P}{\partial y}.$$

The boundary conditions for equation (8) are as follows [2, 3, 7]:

- 1) $\frac{\partial P}{\partial n} = 0$ – on the hard boundaries;
- 2) $\frac{\partial P}{\partial n} = V_n$ – at the boundary where the flow

enters through the ventilation system, V_n – is the known air velocity;

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

3) $P = \text{const}$ – at the boundary of the outflow of the calculation area.

To numerically solve this equation, we will use the scheme of conditional approximation [5]. The difference splitting equations in this case are as follows [5]:

– in the first step of splitting:

$$\frac{P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} - P_{i,j}^n}{\Delta t} = \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i-1,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{-P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}} + P_{i,j-1}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta y^2} \right]; \quad (9)$$

– in the second step of splitting:

$$\frac{P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}}{\Delta t} = \left[\frac{P_{i+1,j}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta x^2} \right] + \left[\frac{P_{i,j+1}^{n+1} - P_{i,j}^{n+1}}{\Delta y^2} \right]. \quad (10)$$

Unknown values of the velocity potential $P_{i,j}^{n+\frac{1}{2}}$, $P_{i,j}^{n+1}$ in each splitting step (9), (10) are determined by the method of point-to-point computation.

The calculation according to dependences (9), (10) ends when [7]:

$$\left| P_{i,j}^{n+1} - P_{i,j}^n \right| \leq \varepsilon,$$

where $P_{i,j}^{n+1}$ – the value of the velocity potential on the new iteration; $P_{i,j}^n$ – the value of the velocity potential on the previous iteration; ε – small number.

To start the calculation it is necessary to set the «initial» value of the velocity potential in the calculation area, during the calculation we take the value $P_{i,j}^0 = 0$.

The components of the air velocity vector are calculated on the sides of the computational cell as follows [3, 7]:

$$u_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i-1,j}}{\Delta x}; \quad v_{ij} = \frac{P_{i,j} - P_{i,j-1}}{\Delta y}.$$

After calculating the velocity component, we perform the solution of the energy equation where this field is used.

Let us consider the algorithm for solving the problem of determining the potential risk of thermal damage to personnel in the shop [1, 2, 7]. First, based on numerical integration of fundamental equations (energy equations and equations for velocity potential) we perform the calculation of the temperature distribution in the shop for different emergencies. When assessing the risk, we assume that the probability of each emergency is known. After calculating the temperature field for different accident scenarios in the shop, the computer program determines the areas where the value of air temperature is greater than the temperature of the damage.

Then we print the forecast results of the thermal damage risk for a certain time point. In this article the various probability of fire point of rocket propellant in shop is considered.

The numerical solution of all difference equations has been programmed. FORTRAN was used to create computer code to simulate the process of thermal air pollution.

Findings

The constructed numerical model was used to assess the potential risk of thermal damage to people in the shop where the solid rocket propellant of Thunder-2 rocket is located. In the event of emergency that leads to the burning of solid rocket propellant inside the shop, there may be a «domino» effect – the ignition of the propellant of a neighboring rocket engine.

The scheme of the calculation area is shown in Fig. 2. The arrow in the Figure shows the direction of air movement in the shop. During the calculations, the task was set to determine the level of temperature pollution in the shop over time and in the working area (position no. 2 in Fig. 2). The air exchange rate in the shop is equal to $\kappa_p = 15$. The initial air temperature in the shop is 20 °C. We assumed that the temperature of combustion products at the accident site is equal to 1 000 °C [7]. For the calculations, the influence of the engine housings in the shop on the formation of temperature fields was taken into account. Below Fig. 3 and 4 show the changes dynamics in air temperature in the shop for different time periods after the emergency.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

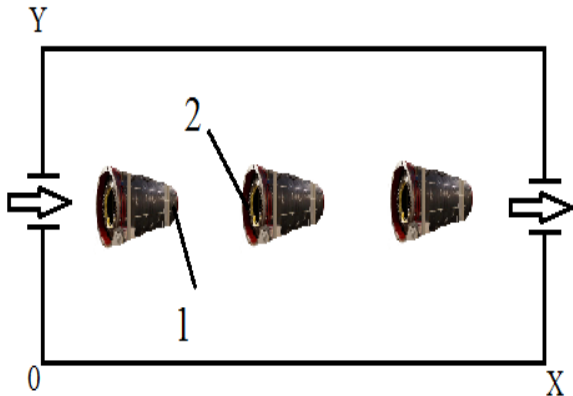


Fig. 2. Scheme of the calculation area:
1 – fire point of propellant in the shop;
2 – solid propellant engines of the Thunder-2 rocket

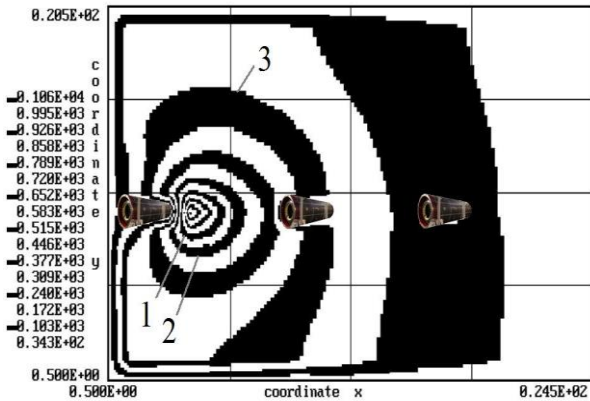


Fig. 3. Zone of thermal pollution (isotherms) inside the shop, $t = 11$ sec:
1 – $T = 789$ °C; 2 – $T = 625$ °C; 3 – $T = 377$ °C

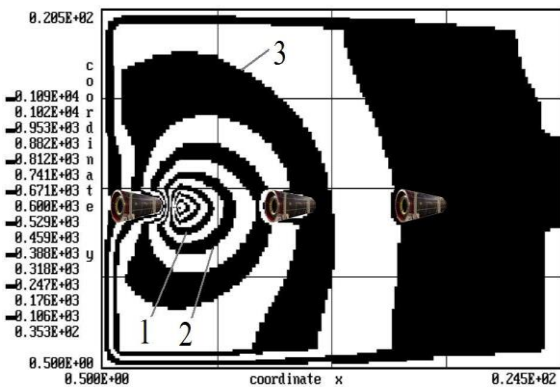


Fig. 4. Zone of thermal pollution (isotherms) inside the shop, $t = 15$ sec:
1 – $T = 812$ °C; 2 – $T = 671$ °C; 3 – $T = 388$ °C

The analysis of the given Figures shows that the thermal pollution zone is formed very quickly in the shop. A zone with a high temperature gradient is formed near the emission source.

Fig. 5 shows the temperature change over time in the working area.

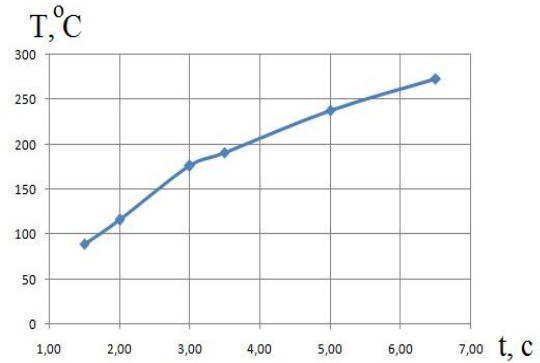


Fig. 5. Change in air temperature over time in the working area

As we can see from the Figure, the air temperature rises very quickly in the working area. In 7 seconds it almost reaches the value of 270 °C, i.e. there is a risk not only of thermal damage to personnel, but also of a «domino» effect – ignition of a neighboring rocket engine, which is located at a distance of 5 m from the engine where the fire started. Fig. 7, 8 show the results of solving another problem to assess the risk of thermal damage to personnel in the shop. The situation when several solid propellant engines are located in the shop is considered (Fig. 6), and the further probability of emergency – the probability of engine ignition in zone no. 1 is 25 %, and in zone no. 2 – 75 %.

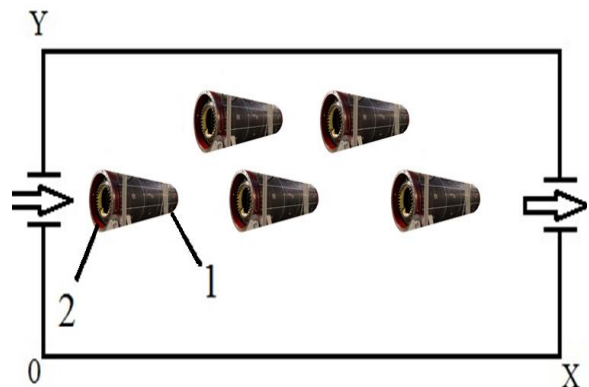


Fig. 6. Scheme of the calculation area (shop where solid propellant engines are located):
1 – fire point no. 1 (fire probability 25 %);
2 – fire point no. 2 (fire probability 75 %)

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Fig. 7, 8 show the matrix of potential territorial risk of thermal damage to people in the shop for different points in time in the case of the realization of these probable situations.

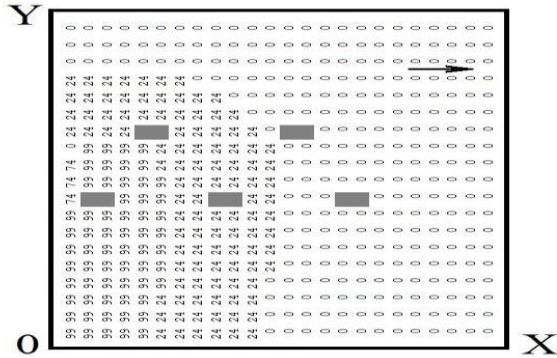


Fig. 7. The probability of thermal damage to personnel in the shop at time $t = 12$ sec

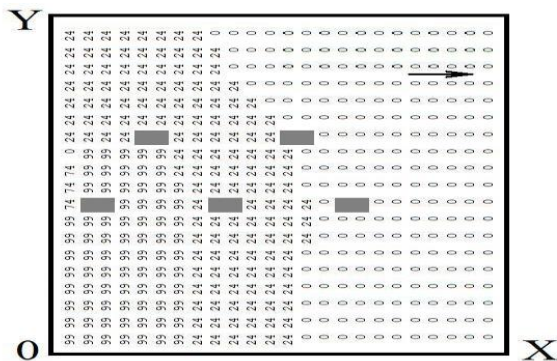


Fig. 8. The probability of thermal damage to personnel in the shop at time $t = 24$ sec

As we can see from the given Figures, for the considered situations the risk of thermal damage to the personnel in the shop is extremely high, be-

cause the zone of thermal damage is formed very quickly.

It should be noted that it took about 5 seconds computer time to solve the problem.

Originality and practical value

A computer model has been built to quickly assess the potential risk of thermal damage to people in the shop in the event of emergency ignition of solid rocket propellant. A code has been developed that allows to quickly model the formation of temperature fields in the shop in case of emergency ignition of solid rocket propellant and to determine the areas of potential thermal damage to workers based on this information.

The developed computer program can be used to assess the risk of thermal damage in the chemical industry in the event of emergency.

Conclusions

1. A computer model has been proposed to predict the risk of thermal damage to shop workers in the event of emergency that results in the ignition of solid rocket propellant.

2. Based on computer simulation data, it can be concluded that in the event of emergency in the shop, there will be lethal thermal damage to workers.

3. The formation of thermal damage zones in the shop is very quickly, so it is necessary to develop measures to save the lives of workers.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Алымов В. Т., Тарасова Н. П. *Техногенный риск. Анализ и оценка* : учеб. пособие для вузов. Москва : Академкнига, 2004. 118 с.
2. Беляев Н. Н., Гунько Е. Ю., Кириченко П. С., Мунтян Л. Я. *Оценка техногенного риска при эмиссии опасных веществ на железнодорожном транспорте*. Кривой Рог : Р. А. Козлов, 2017. 127 с.
3. Згуровский М. З., Скопецкий В. В., Хрущ В. К., Беляев Н. Н. *Численное моделирование распространения загрязнения в окружающей среде*. Киев : Наук. думка, 1997. 368 с.
4. Марчук Г. И. *Математическое моделирование в проблеме окружающей среды*. Москва : Наука, 1982. 320 с.
5. Самарский А. А. *Теория разностных схем*. Москва : Наука, 1983. 616 с.
6. Berlov O. V. Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo. *Наука та прогрес транспорту*. 2016. № 1 (61). С. 48–54. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/60953>
7. Biliaiev M. M., Berlov O. V., Kozachina V. A., Kalashnikov I. V., Shevchenko O. V. Risk assessment of thermal damage to people at industrial sites in case of emergency of burning solid propellant. *Наука та прогрес транспорту*. 2020. № 1 (85). С. 7–16. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/200752>

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

8. Biliaiev M. M., Kharytonov M. M. Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *NATO Science for Peace and Security. Series C : Environmental Security*. Dordrecht, 2012. P. 87–91. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15
9. Boris J., Patnaik G., Obenschain K., Moses A., Obenschain M.-Y., Theodore Y., Delaney J., Donnelly J. Fast and accurate prediction of windborne contaminant plumes for civil defense in cities. *The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010)*. 2010. P. 1–9.
10. Cao C., Li C., Yang Q., Zhang F. Multi-Objective Optimization Model of Emergency Organization Allocation for Sustainable Disaster Supply Chain. *Sustainability*. 2017. Vol. 9. Iss. 11. P. 1–22. DOI: <https://doi.org/10.3390/su9112103>
11. Ilić P., Ilić S., Stojanović Bjelić L. Hazard modelling of accidental release chlorine gas using modern tool-aloha software. *Quality of Life (Banja Luka) - APEIRON*. 2018. Vol. 16. Iss. 1–2. P. 38–45. DOI: <https://doi.org/10.7251/QOL1801038I>
12. Komatina D. Ilić, Galjak J., Belošević S. Simulation of chemical accidents with acetylene in «messer tehnogas» kraljevo plant by «aloha» software program. *The University Thought - Publication in Natural Sciences*. 2018. Vol. 8. Iss. 2. P. 19–26. DOI: <https://doi.org/10.5937/univtho8-18014>
13. Lacombe J.-M., Truchot D., Duplantier S. Application of an innovative risk dedicated procedure for both conventional and 3D atmospheric dispersion models evaluation. *18 International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes (HARMO 18)* (Bologne, Oct 2017). Bologne, 2017. P. 821–825.
14. Lee H., Sohn J.-R., Byeon S.-H., Yoon S., Moon K. Alternative Risk Assessment for Dangerous Chemicals in South Korea Regulation : Comparing Three Modeling Programs. *Int. J. Environ. Res. Public Health*. 2018. Vol. 15. Iss. 8. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph15081600>
15. Sideris G. M., Christolis M. N., Markatos. N. C. Numerical simulation of pollutants dispersion around an electric-arc-furnace in case of an accidental release. *Biodiversity International Journal*. 2020. Vol. 4. Iss. 1. P. 50–57. DOI: <https://doi.org/10.15406/bij.2020.04.00164>

М. М. БІЛЯЄВ^{1*}, О. В. БЕРЛОВ^{2*}, В. В. БІЛЯЄВА^{3*}, В. А. КОЗАЧИНА^{4*},
І. В. КАЛАШНИКОВ^{5*}

^{1*}Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{2*}Каф. «Безпека життєдіяльності», ДВНЗ Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24а, Дніпро, Україна, 49600, тел. +38 (056) 756 34 57, ел. пошта berlov.oleksandr@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

^{3*}Каф. «Аерогідромеханіка та тепломасоперенос», Дніпровський національний університет імені Олеса Гончара, просп. Гагаріна, 72, Дніпро, Україна, 49000, тел. +38 (056) 374 98 22, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0003-2399-3124

^{4*}Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

^{5*}Харківське відділення філії «Проектно-вишукувальний інститут залізничного транспорту» АТ «Українська залізниця», вул. Котляра, 7, Харків, Україна, 61052, тел. +38 (057) 724 41 25, ел. пошта uzr38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

АВАРІЙНЕ ГОРІННЯ ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ПАЛИВА: ОЦІНКА РИЗИКУ УРАЖЕННЯ ЛЮДЕЙ В РОБОЧОМУ ПРИМІЩЕННІ

Мета. Ця робота передбачає розробку комп'ютерної моделі для розрахунку ризику термічного ураження людей у цеху в разі аварійного горіння твердого ракетного палива. **Методика.** Для розрахунку поля температури в цеху, з метою визначення зон термічного ураження працівників у приміщенні, використано рівняння, що виражає закон збереження енергії. На базі цього моделювального рівняння розраховано поле температур у цеху за наявності джерела емісії тепла – твердого ракетного палива, що горить. Розрахунок поля швидкості повітряного потоку в цеху, з урахуванням розташування перешкод на шляху розповсюдження теплової хвилі, проведено на базі моделі безвихрового руху повітря – рівняння потенціалу швидкості. Чисельне розв'язання рівняння для потенціалу швидкості виконано за допомогою двокрокової скінченнорізницевої схеми умовної

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

апроксимації. Для чисельного розв'язання рівняння енергії використано різницеву схему розщеплення. На першому етапі побудови різницевої схеми виконано розщеплення двовимірного рівняння енергії на систему одновимірних рівнянь. Кожне одновимірне рівняння дозволяє розрахувати зміну температури в одному координатному напрямку. Для визначення температури використано схему біжучого рахунку. Під час проведення обчислювального експерименту враховано повітрообмін у приміщенні. Оцінку ризику термічного ураження персоналу в приміщенні виконано для різних вірогідностей місця аварійного горіння твердого ракетного палива. **Результати.** За допомогою розробленої чисельної моделі виконано прогнозування зон потенціального ризику термічного ураження персоналу в цеху для різних аварійних ситуацій. **Наукова новизна.** Побудовано комп'ютерну модель для експрес-оцінки потенціального ризику термічного ураження людей в цеху в разі аварійного горіння твердого ракетного палива. **Практична значимість.** Розроблено код, що дозволяє швидко моделювати формування температурних полів у цеху у випадку аварійного горіння твердого ракетного палива, та на базі цієї інформації визначати зони потенціального термічного ураження працівників. Розроблена комп'ютерна програма може бути використана для оцінки ризику термічного ураження на підприємствах хімічної промисловості в разі виникнення аварійних ситуацій.

Ключові слова: чисельне моделювання; ризик ураження; аварійне горіння твердого ракетного палива; теплове забруднення повітря

Н. Н. БЕЛЯЕВ^{1*}, А. В. БЕРЛОВ^{2*}, В. В. БЕЛЯЕВА^{3*}, В. А. КОЗАЧИНА^{4*},
И. В. КАЛАШНИКОВ^{5*}

^{1*}Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{2*}Каф. «Безопасность жизнедеятельности», ГВУЗ Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Чернышевского, 24а, Днепро, Украина, 49600, тел. +38 (056) 756 34 57, эл. почта berlov@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0002-7442-0548

^{3*}Каф. «Аэрогидромеханика и энергомасоперенос», Днепропетровский национальный университет имени Олеса Гончара, просп. Гагарина, 72, Днепро, Украина, 49000, тел. +38 (056) 374 98 22, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0003-2399-3124

^{4*}Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта v.kozachyna@gmail.com, ORCID 0000-0002-6894-5532

^{5*}Харьковское отделение филиала «Проектно-изыскательный институт железнодорожного транспорта» АО «Українська залізниця», ул. Котляра, 7, Харьков, Украина, 61052, тел. +38 (057) 724 41 25, эл. почта uzp38@ukr.net, ORCID 0000-0002-2814-380X

АВАРИЙНОЕ ГОРЕНИЕ ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ТОПЛИВА: ОЦЕНКА РИСКА ПОРАЖЕНИЯ ЛЮДЕЙ В РАБОЧЕМ ПОМЕЩЕНИИ

Цель. Эта работа предусматривает разработку компьютерной модели для расчета риска термического поражения людей в цехе при аварийном горении твердого ракетного топлива. **Методика.** Для расчета поля температуры в цехе, с целью определения зон термического поражения работников в помещении, использовано уравнение, выражающее закон сохранения энергии. На базе этого моделирующего уравнения рассчитано поле температур в цехе при наличии источника эмиссии тепла – горящего твердого ракетного топлива. Расчет поля скорости воздушного потока в цехе, с учетом расположения препятствий на пути распространения тепловой волны, проведен на базе модели безвихревого движения воздуха – уравнения потенциала скорости. Численное решение уравнения для потенциала скорости выполнено с помощью двухшаговой конечноразностной схемы условной аппроксимации. Для численного решения уравнения энергии использована разностная схема расщепления. На первом этапе построения разностной схемы выполнено расщепление двумерного уравнения энергии на систему одномерных уравнений. Каждое одномерное уравнение позволяет рассчитать изменение температуры в одном координатном направлении. Для определения температуры использована схема бегущего счета. При проведении вычислительного эксперимента учтен воздухообмен в помещении. Оценку риска термического поражения персонала в помещении выполнено для различных вероятностей места аварийного горения твердого ракетного топлива. **Результаты.** С помощью разработанной численной модели выполнено прогнозирование зон потенциального риска термического поражения

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

персонала в цехе для різних аварійних ситуацій. **Научна новизна.** Побудована комп'ютерна модель для експрес-оценки потенціального ризику термічного ураження людей в цеху в разі аварійного горіння твердого ракетного палива. **Практична значимість.** Розроблено код, що дозволяє швидко моделювати формування температурних полів в цеху при аварійному горінні твердого ракетного палива, і на основі цієї інформації визначати зони потенціального термічного ураження працівників. Розроблена комп'ютерна програма може бути використана для оцінки ризику термічного ураження на підприємствах хімічної промисловості в разі виникнення аварійних ситуацій.

Ключові слова: численне моделювання; ризик ураження; аварійне горіння твердого ракетного палива; теплове забруднення повітря

REFERENCES

1. Alymov, V. T., & Tarasova, N. P. (2004). *Tekhnogennyy risk. Analiz i otsenka: uchebnoye posobie dlya vuzov.* Moscow: Akademkniga. (in Russian)
2. Belyaev, N. N., Gunko, Y. Y., Kirichenko, P. S., & Muntyan, L. Y. (2017). *Otsenka tekhnogennoy riska pri emissii opasnykh veshchestv na zheleznodorozhnom transporte.* Krivoi Rog: Kozlov R. A. (in Russian)
3. Zgurovskiy, M. Z., Skopetskiy, V. V., Khrushch, V. K., & Belyaev, N. N. (1997). *Chislennoye modelirovaniye rasprostraneniya zagryazneniya v okruzhayushchey srede.* Kyiv: Naukova dumka. (in Russian)
4. Marchuk, G. I. (1982). *Matematicheskoye modelirovaniye v probleme okruzhayushchey sredy.* Moscow: Nauka. (in Russian)
5. Samarskiy, A. A. (1983). *Teoriya raznostnykh skhem.* Moscow: Nauka. (in Russian)
6. Berlov, O. V. (2016). Atmosphere protection in case of emergency during transportation of dangerous cargo. *Science and Transport Progress*, 1(61), 48-54. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2016/60953> (in English)
7. Biliaiev, M. M., Berlov, O. V., Kozachina, V. A., Kalashnikov, I. V. & Shevchenko, O. V. (2020). Risk assessment of thermal damage to people at industrial sites in case of emergency of burning solid propellant. *Science and Transport Progress*, 1(85), 7-16. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/200752> (in English)
8. Biliaiev, M. M., & Kharytonov, M. M. (2012). Numerical Simulation of Indoor Air Pollution and Atmosphere Pollution for Regions Having Complex Topography. *NATO Science for Peace and Security. Series C: Environmental Security*, 87-91. DOI: https://doi.org/10.1007/978-94-007-1359-8_15 (in English)
9. Boris, J., Patnaik, G., Obenschain, K., Moses, A., Obenschain, M.-Y., Theodore, Y., Delaney, J. & Donnelly, J. (2010). Fast and accurate prediction of windborne contaminant plumes for civil defense in cities. *The Fifth International Symposium on Computational Wind Engineering (CWE2010)*, 1-9. (in English)
10. Cao, C., Li, C., Yang, Q., & Zhang, F. (2017). Multi-Objective Optimization Model of Emergency Organization Allocation for Sustainable Disaster Supply Chain. *Sustainability*, 9(11), 1-22. DOI: <https://doi.org/10.3390/su9112103> (in English)
11. Ilić, P., Ilić, S., & Stojanović Bjelić, L. (2018). Hazard Modelling of Accidental Release Chlorine Gas Using Modern Tool-Aloha Software. *Quality of Life (Banja Luka)-APEIRON*, 16(1-2), 38-45. DOI: <https://doi.org/10.7251/QOL1801038I> (in English)
12. Komatina, D. Ilić, Galjak, J., Belošević, S. (2018). Simulation of chemical accidents with acetylene in «messer tehnogas» kraljevo plant by «aloha» software program. *The University Thought-Publication in Natural Sciences*, 8(2), 19-26. DOI: <https://doi.org/10.5937/univtho8-18014> (in English)
13. Lacombe, J. M., Truchot, D. & Duplantier S. (2017). Application of an innovative risk dedicated procedure for both conventional and 3D atmospheric dispersion models evaluation. *8 International Conference on Harmonisation within Atmospheric Dispersion Modelling for Regulatory Purposes (HARMO 18)* (pp. 821-825). Bologna, Italy. (in English)
14. Lee, H., Sohn, J.-R., Byeon, S.-H., Yoon, S., & Moon, K. (2018). Alternative Risk Assessment for Dangerous Chemicals in South Korea Regulation: Comparing Three Modeling Programs. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 15(8), 1-12. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph15081600> (in English)
15. Sideris, G. M., Christolis, M. N., Markatos, N. C. (2020). Numerical simulation of pollutants dispersion around an electric-arc-furnace in case of an accidental release. *Biodiversity International Journal*, 4(1), 50-57. DOI: <https://doi.org/10.15406/bij.2020.04.00164> (in English)

Received: January 30, 2020

Accepted: June 02, 2020

УДК 504.5:[628.334.5/6:519.87]

М. В. ЛЕМЕШ^{1*}, М. М. БІЛЯЄВ^{2*}, Л. Г. ТАТАРКО^{3*}, З. М. ЯКУБОВСЬКА^{4*}

^{1*}Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1230-8040

^{2*}Каф. «Гідравліка та водопостачання», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, ел. пошта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{3*}Каф. «Енергетика», Український державний хіміко-технологічний університет, пр. Гагаріна, 8, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 753 56 38, ел. пошта larisa.tatarco@gmail.com, ORCID 0000-0002-2080-6090

^{4*}Каф. «Енергетика», Український державний хіміко-технологічний університет, пр. Гагаріна, 8, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (056) 753 56 38, ел. пошта physics@udhtu.edu.ua, ORCID 0000-0002-9893-3479

МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ БІОЛОГІЧНОГО ОЧИЩЕННЯ СТИЧНИХ ВОД НА БАЗІ КАМЕРНИХ МОДЕЛЕЙ

Мета. Основною метою статті є розробка багатофакторних камерних моделей для експрес-оцінки ефективності роботи реакторів біологічного очищення стічних вод. **Методика.** Для комп'ютерного моделювання процесу біологічного очищення стічних вод розроблено дві чисельні камерні моделі. В основу моделей покладено закон збереження маси для субстрату та активного мулу. Моделі є нуль-вимірними. У першій камерній моделі процес окислення забруднювача розраховують на базі реакції першого порядку. У другій камерній моделі для розрахунку окислення забруднювача використано модель Monod. Для чисельного інтегрування моделювальних рівнянь використано метод Ейлера. Моделі дозволяють під час розрахунку біореактора, враховувати зміну з часом концентрації активного мулу, субстрату, що потрапляють до реактора для біологічного очищення стічних вод. **Результати.** Здійснено програмну реалізацію розроблених чисельних моделей. Наведено результати комп'ютерних експериментів із дослідження ефективності очищення стічних вод у реакторах біологічного очищення для різних умов експлуатації споруд. **Наукова новизна.** Розроблено дві комп'ютерні камерні моделі, що дозволяють швидко оцінити ефективність роботи біореактора для очищення стічних вод. **Практична значимість.** Моделі можуть бути корисні під час проведення розрахунків у випадку проектування споруд біологічного очищення або під час реконструкції наявних біореакторів для їх перспективної роботи в нових умовах.

Ключові слова: очищення води; чисельне моделювання; біореактор; водокористування

Вступ

Біологічне очищення стічних вод широко використовують у віх країнах світу, тому що це ефективний спосіб ліквідації органічних забруднень. На етапі проектування споруд біологічного очищення, реконструкції наявних біореакторів виникає потреба швидко оцінити ефективність роботи споруд для нових умов експлуатації [3, 4, 6]. Але для розв'язання таких задач використання фізичного експерименту не є доцільним. Це пов'язано з тим, що фізичний експеримент у цій галузі потребує значного часу (ріст біоплівки триває декілька тижнів). Крім цього, з огляду на сучасні вимоги до результатів експериментальних досліджень слід підкреслити, що експеримент потребує використання

дуже вартісного обладнання, яке практично відсутнє в Україні. Тому особливе значення мають математичні моделі, що дозволяють швидко аналізувати ефективність роботи біореакторів. Для аналізу роботи споруд з очищення стічних вод використовують емпіричні [3–5], аналітичні та чисельні моделі [1, 2, 7–17]. Але в наш час існує певний дефіцит моделей для аналізу ефективності роботи біореакторів для очищення стічних вод. У зв'язку з цим можна говорити, що розробка сучасних методів комп'ютерного моделювання багатофакторного процесу очищення стічних вод у біологічних реакторах є важливою задачею.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

Мета

Метою роботи є розробка камерних комп'ютерних моделей для оцінки ефективності очистки стічних вод в біореакторах. Ставиться задача створити багатофакторні моделі, що дозволяють швидко визначати динаміку очистки стічних вод з урахуванням зміни, з часом, концентрації субстрату, що надходить в біореактор.

Методика

Під час побудови моделей біологічного очищення води в умовах нелімітованого кисневого режиму в споруді будемо враховувати такі фактори:

- процес зміни концентрації субстрату в реакторі з часом;
- процес зміни концентрації активного мулу в реакторі з часом;
- процес потрапляння до споруди активного мулу (можливе потрапляння різної кількості в різні моменти часу);
- процес потрапляння до біореактора субстрату (можливе потрапляння різної кількості в різні моменти часу).

Побудуємо математичний опис процесу очищення води в біореакторі, що дозволяє врахувати ці фактори. Для цього будемо використовувати закон збереження маси. Розрахункова схема показана на рис. 1.

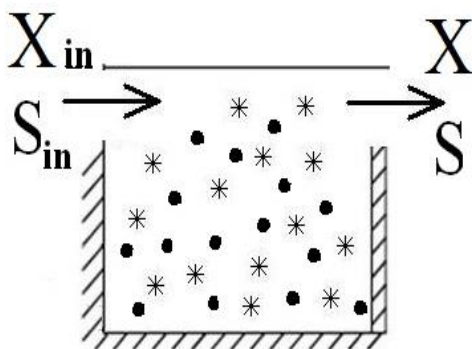


Рис. 1. Розрахункова схема споруди

Fig. 1. Computational scheme of the structure

Рівняння матеріального балансу для субстрату та активного мулу в реакторі, з урахуванням моделі Monod [17], можна записати так:

$$W \cdot dX = dt \cdot Q_x(t) \cdot X_{in}(t) - dt \cdot Q_x(t) \cdot X + dt \cdot \mu \cdot W \cdot X - dt \cdot K_d \cdot W \cdot X; \quad (1)$$

$$W \cdot dS = dt \cdot Q_s(t) \cdot S_{in} - dt \cdot Q_s(t) \cdot S(t) - dt \cdot \frac{\mu}{Y} \cdot W \cdot X; \quad (2)$$

$$\mu = \mu_{\max} \cdot \frac{S}{S + K_s}. \quad (3)$$

де $X_{in}(t)$ – концентрація активного мулу, що потрапляє до аеротенка; $S_{in}(t)$ – концентрація субстрату, що потрапляє до споруди; W – об'єм реактора; $Q_s(t)$ – витрата субстрату; $Q_x(t)$ – витрата активного мулу; K_d – коефіцієнт вимирання активного мулу; t – час; X – концентрація активного мулу в реакторі; S – концентрація субстрату в споруді; μ – коефіцієнт; Y – параметр [17].

Рівняння (1) і (2) описують зміну концентрації активного мулу та субстрату в споруді за час dt .

Для системи рівнянь (1) і (2) потрібно задати початкові умови в разі $t = 0$:

$$X = X_0; \quad S = S_0. \quad (4)$$

Поряд із моделлю (1)–(3) розглянемо спрощену модель:

$$W \cdot dS = dt \cdot Q_s(t) \cdot S_{in}(t) - dt \cdot Q_s(t) \cdot S(t) - W \cdot dt \cdot K_1 \cdot S, \quad (5)$$

де K_1 – емпірична константа, що враховує зміну концентрації субстрату внаслідок біологічного очищення [4]. Моделювальне рівняння (5) представляє закон збереження маси субстрату з урахуванням того, що має місце рух стічних вод у реакторі та «перетворення» субстрату зі швидкістю, яка задається параметром K_1 .

Розв'язання моделювальних рівнянь (1) і (2) дозволяє визначати значення концентрації активного мулу та субстрату в аеротенку з часом, тобто прогнозувати ефективність роботи аеротенка. Але ця система є системою нелінійних рівнянь. Тому для чисельного інтегрування не-

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

лінійних рівнянь (1), (2) і (5) будемо використовувати метод Ейлера. Тоді розрахункові залежності будуть мати вигляд:

$$X^{n+1} = X^n + dt \cdot Q_{xw}(t^n) \cdot X_{in}^n(t^n) - dt \cdot Q_{xw}(t^n) \cdot X^n + dt \cdot \mu^n \cdot X^n - dt \cdot K_d \cdot X^n, \quad (6)$$

$$S^{n+1} = S^n + dt \cdot Q_{sw}(t^n) \cdot S_{in}^n - dt \cdot Q_{sw}(t^n) \cdot S_{in}^n(t) - dt \cdot \frac{\mu^n}{Y} X^{n+1}, \quad (7)$$

$$\text{де } Q_{sw} = \frac{Q_s}{W}, \quad Q_{xw} = \frac{Q_x}{W}.$$

На базі розрахункових залежностей (6) і (7) визначають значення концентрації активного мулу та субстрату в біореакторі на новому часовому кроці ($n+1$). Під час розрахунку використовують параметри з попереднього часового кроку n . Для початку розрахунку використовують значення параметрів за $t=0$, тобто відомі початкові дані. Відзначимо, що розглянуті моделі відрізняють від відомих моделей тим, що в них враховано зміну витрати субстрату та активного мулу з часом, а також зміну з часом концентрації активного мулу та субстрату, що потрапляють до споруди.

Для чисельного розв'язання рівняння (5) використовують залежність (отриману на базі методу Ейлера):

$$S^{n+1} = S^n + dt \cdot Q_{sw}(t^n) \cdot S_{in}^n - dt \cdot Q_{sw}(t^n) \cdot S^n - dt \cdot K_1 \cdot S^n. \quad (8)$$

Для кодування різницевих рівнянь (6) і (7) використано FORTRAN. Створено код «BIO-1», для використання якого потрібно задати такі вхідні дані:

- $X_{in}(t)$ – концентрацію активного мулу, що потрапляє до біореактора;
- $S_{in}(t)$ – концентрацію субстрату, що потрапляє до біореактора;
- W – об'єм біореактора;
- $Q_s(t)$ – витрата з часом субстрату;
- $Q_x(t)$ – витрата з часом активного мулу;
- Y – параметр у моделі Monod.

На базі залежності (8) створено код «BIO-12», для використання якого потрібно задати такі вхідні дані:

- $S_{in}(t)$ – концентрацію субстрату, що потрапляє до біореактора;
- W – об'єм біореактора;
- $Q_s(t)$ – витрату з часом субстрату;
- K_1 – параметр.

Результати

Нижче наведено результати розрахунку зміни концентрації субстрату на виході з аеротенка за таких вхідних даних [5]:

- $S_{in} = 140$ мг/л – концентрація субстрату (БПК_{пов}), що потрапляє до споруди;
- $W = 12\,388$ м³ – об'єм аеротенка;
- $K_1 = 32$ (1/доб) – коефіцієнт швидкості деструкції субстрату в реакторі.

Початкова умова: $S_{in} = 140$ мг/л – концентрація субстрату в реакторі для моменту часу $t=0$.

Було розглянуто три сценарії:

- сценарій № 1: має місце рівномірна подача стічних вод до реактора;
- сценарій № 2: має місце рівномірна подача стічних вод до реактора, але на інтервалі 5–8 год збільшується на 30 % концентрація субстрату в стічних водах (аварійна ситуація);
- сценарій № 3: має місце рівномірна подача стічних вод до реактора, але на інтервалі 5–8 год збільшується на 30 % концентрація субстрату в стічних водах та на 30 % витрата стічних вод (аварійна ситуація).

На рис. 2 показано, як змінюється концентрація субстрату на виході з реактора для розглянутих сценаріїв.

Як бачимо з рис. 2, за рівномірної подачі стічних вод до моменту часу $t=5$ год встановлюється стаціонарний режим, концентрація субстрату на виході з реактора становить 15 мг/л. У випадку сценарію № 2 та № 3 ми бачимо сплеск концентрації субстрату в реакторі й погіршення ефективності його роботи. Але до моменту часу $t=9$ год реактор уже повертає свою ефективність. Тобто протягом 1 год реактор може відновити свою ефективність.

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

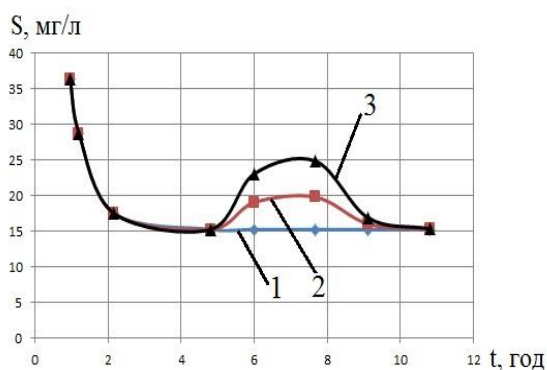


Рис. 2. Зміна концентрації субстрату на виході з реактора:
1 – рівномірна подача субстрату до реактора, сценарій № 1; 2 – сценарій № 2; 3 – сценарій № 3

Fig. 2. Changing substrate concentration at the reactor outlet:

1 – uniform supply to the reactor, scenario no. 1; 2 – scenario no. 2; 3 – scenario no. 3

Нижче наведено результати розв'язання задачі з оцінки ефективності роботи біологічного реактора на базі розроблених моделей (6) і (7), тобто у випадку використання моделі Monod для описання біологічного очищення стічних вод. Розрахунки виконано за таких вхідних даних [17]:

$S_{in} = 160$ мг/л – концентрація субстрату (БПК_{пов}), що потрапляє до біореактора;

$X_{in} = 1,5$ г/л – концентрація активного мулу, що потрапляє до реактора;

$\mu_{max} = 1,4$ – параметр;

$K_s = 100$ мг/л – параметр;

$K_d = 0,055$ 1/доб – коефіцієнт, що враховує загибель мікроорганізмів;

$Y = 0,55$ – параметр.

Початкова умова: $S_{in} = 160$ мг/л,

$X_{in} = 1,5$ г/л – концентрація субстрату та активного мулу в реакторі для моменту часу $t = 0$.

Було розглянуто три сценарії:

– сценарій № 1: немає подачі стічних вод та активного мулу до реактора, тобто йде процес очищення тільки тих стічних вод, що є в початковий момент у споруді;

– сценарій № 2: має місце рівномірна подача стічних вод та активного мулу до реактора.

– сценарій № 3: має місце рівномірна пода-

ча стічних вод та активного мулу до реактора, але на інтервалі 0,0032–0,016 (час безрозмірний) збільшується на 70 % концентрація субстрату в стічних водах, що потрапляють на очищення (аварійна ситуація).

На рис. 3 показано, як змінюється концентрація субстрату на виході з реактора для першого сценарію (час безрозмірний).

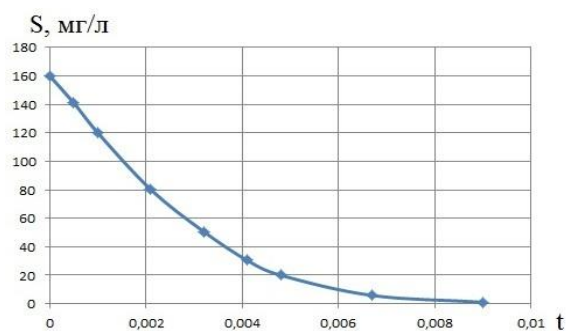


Рис. 3. Концентрація субстрату на виході з реактора (сценарій № 1)

Fig. 3. Substrate concentration at the the reactor outlet (scenario no. 1)

Як бачимо з рис. 3, у біореакторі з часом має місце поступове зниження концентрації субстрату до нуля.

На рис. 4 і 5 показано, як змінюється концентрація субстрату та активного мулу на виході з реактора для другого сценарію. Ці рисунки ілюструють динаміку «виходу» реактора на стаціонарний режим роботи.

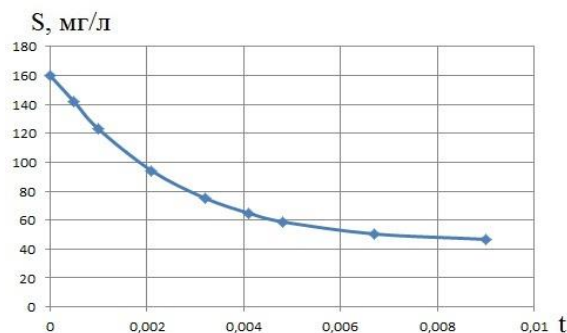


Рис. 4. Концентрація субстрату на виході з реактора (сценарій № 2)

Fig. 4. Substrate concentration at the the reactor outlet (scenario no. 2)

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

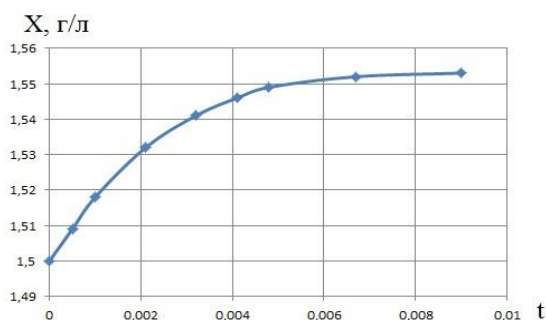


Рис. 5. Концентрація активного мулу на виході з реактора (сценарій № 2)

Fig. 5. Concentration of activated sludge at the reactor outlet (scenario no. 2)

На рис. 6 і 7 показано, як змінюється концентрація субстрату та активного мулу на виході з реактора для сценарію № 3, тобто, у випадку раптового збільшення кількості субстрату в стічних водах унаслідок аварії на об'єкті.

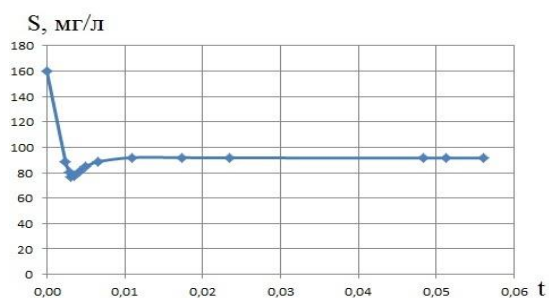


Рис. 6. Концентрація субстрату на виході з реактора (сценарій № 3)

Fig. 6. Substrate concentration at the the reactor outlet (scenario no. 3)

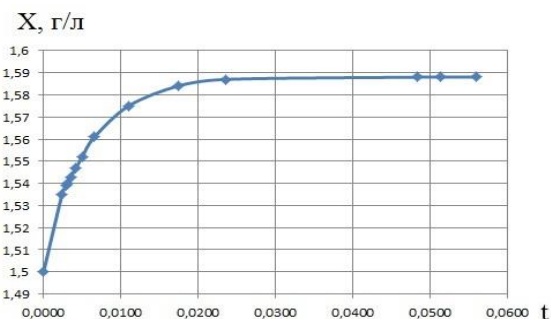


Рис. 7. Концентрація активного мулу на виході з реактора (сценарій № 3)

Fig. 7. Concentration of activated sludge at the reactor outlet (scenario no. 3)

Як бачимо з рис. 6, спочатку має місце зменшення концентрації домішки, що виходить з реактора, але з моменту часу приблизно $t = 0,005$ починається зростання концентрації субстрату на виході з реактора. Це означає погіршення ефективності біологічного очищення стічних вод. Із моменту часу $t = 0,01$ у реакторі встановлюється усталений режим очищення, але на виході з реактора, ми маємо значну концентрацію субстрату, тобто на цьому часовому інтервалі, що розглядається, реактор працює неефективно.

Із рис. 7 бачимо, що концентрація активного мулу спочатку поступово зростає, а далі виходить на стаціонарний режим.

Відзначимо, що час розрахунку кожної задачі на базі розроблених комп'ютерних моделей та програм склав 0,5 с, тобто, розроблені моделі можна використовувати для проведення серійних розрахунків із метою аналізу ефективності роботи реакторів для біологічного очищення стічних вод. Основна вимога до аналізу роботи реакторів на базі побудованих моделей – обґрунтоване визначення вхідних параметрів для них.

Наукова новизна та практична значимість

Запропоновано дві камерні чисельні моделі для оцінки ефективності роботи реактора біологічного очищення стічних вод. Особливістю моделей є можливість оцінювати роботу біореакторів за змінних режимів експлуатації споруд. Моделі базуються на фундаментальному законі механіки суцільного середовища – законі збереження маси.

Розроблені чисельні моделі дозволяють швидко визначати концентрацію субстрату та активного мулу на виході з біореактора. Моделі можуть бути корисні під час проведення розрахунків у випадку проектування споруд біологічного очищення або під час реконструкції наявних біореакторів для їх перспективної роботи в нових умовах.

Висновки

У статті розглянуто нові камерні чисельні моделі, що дозволяють визначати ефективність роботи реакторів для біологічного очищення

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

стічних вод. Результати обчислювальних експериментів показують, що запропоновані чисельні моделі дозволяють визначити зміну ефективності роботи реакторів із часом за різних умов експлуатації споруд.

У подальшому цей науковий напрям слід розвивати в галузі розробки багатовимірних чисельних моделей для оцінки ефективності роботи біореакторів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Беляев Н. Н., Нагорная Е. К. *Математическое моделирование массопереноса в отстойниках систем водоотведения* : монографія. Днепропетровск : Новая идеология, 2012. 112 с.
2. Беляев Н. Н., Козачина В. А. *Математическое моделирование массопереноса в горизонтальных отстойниках* : монографія. Днепропетровск : Акцент ПП, 2015. 115 с.
3. Василенко О. А., Грабовський П. О., Ларкіна Г. М., Поліщук О. В., Прогульний В. Й. *Реконструкція і інтенсифікація споруд водопостачання та водовідведення* : навч. посіб. Київ : ІВНВКП «Укреліотек», 2010. 272 с.
4. Карелин Я. А., Жуков Д. Д., Журов В. Н., Репин Б. Н. *Очистка производственных сточных вод в аэротенках*. Москва : Стройиздат, 1973, 223 с.
5. Ласков Ю. М., Воронов Ю. В., Калицун В. И. *Примеры расчетов канализационных сооружений*. Москва : Высшая школа, 1981. 237 с.
6. Олійник О. Я., Айрапетян Т. С. Моделювання очисних стічних вод від органічних забруднень в біореакторах-аэротенках зі зваженим (вільно плаваючим) і закріпленим біоценозом. *Доповідь НАН України*. 2015. № 5. С. 55–60. DOI: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2015.05.055>
7. Alharbi A. O. M. The biological treatment of wastewater : mathematical models. *Bulletin of the Australian Mathematical Society*. 2016. Vol. 94. Iss. 2. P. 347–348. DOI: <https://doi.org/10.1017/S0004972716000411>
8. Amaral A., Gillot S., Garrido-Baserba M., Filali A., Karpinska A. M., Plósz B. G., ... Rosso D. Modelling gas-liquid mass transfer in wastewater treatment : when current knowledge needs to encounter engineering practice and vice-versa. *Water Science & Technology*. 2019. Vol. 80. Iss. 4. P. 607–619. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2019.253>
9. Babaei A., Azadi R., Jaafarzadeh N., Alavi N. Application and Kinetic Evaluation of upflow Anaerobic bio-film Reactor for Nitrogen Removal from Wastewater. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*. 2013. Vol. 10. Iss. 1. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1186/1735-2746-10-20>
10. Bomba A., Klymiuk Y., Prysiazniuk I., Prysiazniuk O., Safonyk A. Mathematical modeling of wastewater treatment from multicomponent pollution by through microporous filling. *AIP Conference Proceedings*. 2016. Vol. 1773. P. 040003-1–040003-11. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4964966>
11. Dapelo D., Bridgeman G. A CFD strategy to retrofit an anaerobic digester to improve mixing performance in wastewater treatment. *Water Science & Technology*. 2020. Vol. 81. Iss. 8. P. 1646–1657. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2020.086>
12. Gao H., Stenstrom M. K. Development and applications in CFD modeling for secondary settling tanks over the last three decades : A review. *Water Environment Research*. 2019. Vol. 92. Iss. 6. P. 796–820. DOI: <https://doi.org/10.1002/wer.1279>
13. Gao H., Stenstrom M. K. Influence of Model Parameters and Inlet Turbulence Boundary Specification Methods in Secondary Settling Tanks : Computational Fluid Dynamics Study. *Journal of Environmental Engineering*. 2020. Vol. 146. Iss. 5. P. 04020028-1–04020028-12. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001689](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001689)
14. Gao H., Stenstrom M. K. Computational Fluid Dynamics Analysis for Improving Secondary Settling Tank Performance. *Conference : World Environmental and Water Resources Congress 2020*. 2020. P. 212–224. DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784482988.021>
15. Griborio A. *Secondary Clarifier Modeling : A Multi-Process Approach. Dissertation and Theses*. University of New Orleans : USA, 2004. 440 p.
16. Mocanu C. R., Mihaillescu R. Numerical Simulation Wastewater Treatment Aeration Processes. *U. P. B. Sci. Bull., Series D*. 2012. Vol. 74. Iss. 2. P. 191–198.

17. Pereda M., Zamarrero J. M. Agent – based modeling of an activated sludge process in batch reactor. *19th Mediterranean Conference on Control and Automation Aquis*. 2011. P. 1128–1133.
DOI: <https://doi.org/10.1109/med.2011.5983027>

М. В. ЛЕМЕШ^{1*}, Н. Н. БЕЛЯЕВ^{2*}, Л. Г. ТАТАРКО^{3*}, З. М. ЯКУБОВСКАЯ^{4*}

^{1*}Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1230-8040

^{2*}Каф. «Гидравлика и водоснабжение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 273 15 09, эл. почта water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{3*}Каф. «Энергетика», Украинский государственный химико-технологический университет, пр. Гагарина, 8, Днепро, Украина, 49005, тел. +38 (056) 753 56 38, эл. почта larisa.tatarco@gmail.com, ORCID 0000-0002-2080-6090

^{4*}Каф. «Энергетика», Украинский государственный химико-технологический университет, пр. Гагарина, 8, Днепро, Украина, 49005, тел. +38 (056) 753 56 38, эл. почта physics@udhtu.edu.ua, ORCID 0000-0002-9893-3479

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД НА БАЗЕ КАМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ

Цель. Основной целью статьи является разработка многофакторных камерных моделей для экспресс-оценки эффективности работы реакторов биологической очистки сточных вод. **Методика.** Для компьютерного моделирования процесса биологической очистки сточных вод разработаны две численные камерные модели. В основу моделей положен закон сохранения массы для субстрата и активного ила. Модели ноль-мерные. В первой камерной модели процесс окисления загрязнителя рассчитывают на базе реакции первого порядка. Во второй камерной модели для расчета окисления загрязнителя использовано модель Monod. Для численного интегрирования моделирующих уравнений использован метод Эйлера. Модели позволяют при расчете биореактора учитывать изменение со временем концентрации активного ила, субстрата, попадающих в реактор для биологической очистки сточных вод. **Результаты.** Осуществлена программная реализация разработанных численных моделей. Приведены результаты компьютерных экспериментов по исследованию эффективности очистки сточных вод в реакторах биологической очистки для различных условий эксплуатации сооружений. **Научная новизна.** Разработаны две компьютерные камерные модели, позволяющие быстро оценить эффективность работы биореактора для очистки сточных вод при различных условиях эксплуатации. **Практическая значимость.** Модели могут быть полезными при проведении расчетов в случае проектирования сооружений биологической очистки или во время реконструкции существующих биореакторов для их перспективной работы в новых условиях.

Ключевые слова: очистка воды; численное моделирование; биореактор; водопользование

М. В. LEMESH^{1*}, М. М. BILIAIEV^{2*}, Л. Н. TATARCO^{3*}, Z. M. YAKUBOVSKA^{4*}

^{1*}Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1230-8040

^{2*}Dep. «Hydraulics and Water Supply», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 273 15 09, e-mail water.supply.treatment@gmail.com, ORCID 0000-0002-1531-7882

^{3*}Dep. «Energy», Ukrainian State University of Chemical Technology, Haharina Av., 8, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 753 56 38, e-mail larisa.tatarco@gmail.com, ORCID 0000-0002-2080-6090

^{4*}Dep. «Energy», Ukrainian State University of Chemical Technology, Haharina Av., 8, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (056) 753 56 38, e-mail physics@udhtu.edu.ua, ORCID 0000-0002-9893-3479

MODELING OF THE PROCESS OF BIOLOGICAL WASTEWATER TREATMENT BASED ON CHAMBER MODELS

Purpose. The aim of the work is to develop multifactor chamber models for rapid evaluation of the efficiency of reactors for biological wastewater treatment. **Methodology.** Two numerical chamber models have been developed for computer simulation of the biological wastewater treatment process. The models are based on the law of mass conservation for substrate and activated sludge. The models are zero-dimensional. In the first chamber model, the pollutant oxidation process is calculated based on a first-order reaction. The second chamber model uses the Monod model to calculate pollutant oxidation. Euler's method is used for numerical integration of modeling equations. The models allow, when calculating the bioreactor, to take into account the change over time in the concentration of activated sludge, the substrate entering the reactor for biological wastewater treatment. **Findings.** The software implementation of the developed numerical models is carried out. The results of computer experiments to study the efficiency of wastewater treatment in reactors for biological wastewater treatment for different operating conditions are presented. **Originality.** Two computer chamber models have been developed to quickly evaluate the efficiency of a bioreactor for wastewater treatment under different operating conditions. **Practical value.** The developed computer models can be used to determine the efficiency of biological wastewater treatment in reactors under different operating conditions.

Keywords: water purification; numerical simulation; bioreactor; water use

REFERENCES

1. Biliaiev, N. N., & Nagornaya, E. K. (2012). *Matematicheskoye modelirovaniye massoperenosa v otstoynikakh sistem vodootvedeniya: monografiya*. Dnepropetrovsk: Novaya ideologiya. (in Russian)
2. Biliaiev, N. N., & Kozachina, V. A. (2015). *Modelirovaniye massoperenosa v gorizontalnykh otstoynikakh: monografiya*. Dnepropetrovsk: Aktsent PP. (in Russian)
3. Vasylenko, O. A., Hrabovskyi, P. O., Larkina, H. M., Polishchuk, O. V., & Prohulnyi, V. Y. (2010). *Rekonstruktsiia i in-tensyfikatsiia sporud vodopostachannia ta vodovidvedennia: navchalnyi posibnyk*. Kyiv: IVNVKP «Ukrheliotek». (in Ukrainian)
4. Karelin, Ya. A., Zhukov, D. D., Zhurov, V. N., & Repin, B. N. (1973). *Ochistka proizvodstvennykh stochnykh vod v aerotenkah*. Moscow: Stroiyzdat. (in Russian)
5. Laskov, Yu. M., Voronov, Yu. V., & Kalicun, V. I. (1981). *Primery raschetov kanalizacionnykh sooruzhenij*. Moscow: Vysshaya Shkola. (in Russian)
6. Oleynik, A. Y., & Airapetyan, T. S. (2015). The modeling of the clearance of waste waters from organic pollutions in bioreactors-aerotanks with suspended (free flow) and fixed biocenoses. *Reports of the National Academy of Sciences of Ukraine*, 5, 55-60. DOI: <https://doi.org/10.15407/dopovidi2015.05.055> (in Ukrainian)
7. Alharbi, A. O. M. (2016). The biological treatment of wastewater: mathematical models. *Bulletin of the Australian Mathematical Society*, 94(2), 347-348. DOI: <https://doi.org/10.1017/s0004972716000411> (in English)
8. Amaral, A., Gillot, S., Garrido-Baserba, M., Filali, A., Karpinska, A. M., Plósz, B. G., ... & Rosso, D. (2019). Modelling gas-liquid mass transfer in wastewater treatment: when current knowledge needs to encounter engineering practice and vice-versa. *Water Science & Technology*, 80(4), 607-619. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2019.253> (in English)
9. Babaei, A., Azadi, R., Jaafarzadeh, N., & Alavi, N. (2013). Application and Kinetic Evaluation of upflow Anaerobic biofilm Reactor for Nitrogen Removal from Wastewater. *Iranian Journal of Environmental Health Science and Engineering*, 10(1), 1-8. DOI: <https://doi.org/10.1186/1735-2746-10-20> (in English)
10. Bomba, A., Klymiuk, Y., Prysiazhniuk, I., Prysiazhniuk, O., & Safonyk, A. (2016). Mathematical modeling of wastewater treatment from multicomponent pollution by through microporous filling. *AIP Conference Proceedings*, 1773, 040003-1-040003-11. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4964966> (in English)
11. Dapelo, D., & Bridgeman, G. (2020). A CFD strategy to retrofit an anaerobic digester to improve mixing performance in wastewater treatment. *Water Science & Technology*, 81(8), 1646-1657. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2020.086> (in English)

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

12. Gao, H., & Stenstrom, M. K. (2019). Development and applications in CFD modeling for secondary settling tanks over the last three decades: A review. *Water Environment Research*, 92(6), 796-820
DOI: <https://doi.org/10.1002/wer.1279> (in English)
13. Gao, H., & Stenstrom, M. K. (2020). Influence of Model Parameters and Inlet Turbulence Boundary Specification Methods in Secondary Settling Tanks: Computational Fluid Dynamics Study. *Journal of Environmental Engineering*, 146(5), 04020028-1-04020028-12.
DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001689](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001689) (in English)
14. Gao, H., & Stenstrom, M. K. (2020). Computational Fluid Dynamics Analysis for Improving Secondary Settling Tank Performance. *Conference: World Environmental and Water Resources Congress 2020*, 212-224.
DOI: <https://doi.org/10.1061/9780784482988.021> (in English)
15. Griborio, A. (2004). *Secondary Clarifier Modeling: A Multi-Process Approach. Dissertation and Theses*. USA, University of New Orleans Publ. (in English)
16. Mocanu, C. R., & Mihaillescu, R. (2012). Numerical Simulation Wastewater Treatment Aeration Processes. *U. P. B. Sci. Bull., Series D*, 74(2), 191-198.
17. Pereda M., & Zamarreno J. M. (2011). Agent-based modeling of an activated sludge process in batch reactor. *19th Mediterranean Conference on Control and Automation Aquis*. 1128-1133.
DOI: <https://doi.org/10.1109/med.2011.5983027> (in English)

Надійшла до редколегії: 03.02.2020

Прийнята до друку: 04.06.2020

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

УДК 656.212:004.942

Є. Б. ДЕМЧЕНКО^{1*}, В. В. МАЛАШКІН^{2*}, І. Я. СКОВРОН^{3*}

^{1*} Каф. «Транспортні вузли», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (097) 799 16 75, ел. пошта e.b.dmch@gmail.com, ORCID 0000-0003-1411-6744

^{2*} Каф. «Транспортні вузли», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 793 19 13, ел. пошта viacheslav.malashkin@gmail.com, ORCID 0000-0002-5650-1571

^{3*} Каф. «Транспортні вузли», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (095) 230 50 34, ел. пошта norvoks@gmail.com, ORCID 0000-0003-0697-2698

ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ СТАНЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕРЕЖ ПЕТРІ

Мета. Ця робота полягає у визначенні раціональних параметрів залізничної станції на основі імітаційного моделювання процесу її функціонування, що представлений мережею Петрі в середовищі QPNet на основі запропонованої методики техніко-економічного порівняння варіантів. **Методика.** Автори представили методику формалізації процесу функціонування сортувального комплексу за допомогою мережі Петрі в середовищі QPNet. Особливу увагу приділено формалізації роботи гіркового локомотива. Розроблено методику техніко-економічного порівняння варіантів оснащення сортувального комплексу, в основі якої лежить використання модифікованих зведених витрат. **Результати.** Автори виконали огляд наявних систем імітаційного моделювання, які бувають спеціалізованими та універсальними. Спеціалізовані мають більші можливості для відображення, дозволяють швидше й точніше створювати моделі для конкретних об'єктів, а також отримувати за їх допомогою кращий набір результатів. Разом із тим більше визнання отримали саме універсальні системи попри вимогу певного їх доопрацювання й адаптації під конкретний процес, оскільки спеціалізовані імітаційні системи є платними або не досить відомими, що не дозволяє широкому колу дослідників використовувати їх для вирішення поставлених завдань. У статті наведено результати роботи сортувального комплексу за різного оснащення, які встановлені під час моделювання його роботи в середовищі QPNet. Отримані значення техніко-технологічних параметрів сортувального комплексу стали основою для визначення раціональних заходів, спрямованих на підвищення ефективності функціонування сортувальної станції в різних експлуатаційних умовах її роботи. **Наукова новизна.** Удосконалено імітаційну модель сортувального комплексу, процес функціонування якого представлений часовою мережею Петрі, що, на відміну від інших моделей, дозволяє враховувати додатковий час зайнятості гіркового локомотива іншими операціями, не пов'язаними з розформуванням составів на сортувальній гірці безпосередньо. **Практична значимість.** Представлена в роботі вдосконалена імітаційна модель сортувального комплексу дає можливість більш точно враховувати вплив технічного оснащення залізничної станції на показники її функціонування.

Ключові слова: залізнична станція; імітаційне моделювання; мережа Петрі; оснащення станції; середовище QPNet

Вступ

Залізничний транспорт є найважливішою галуззю країни, що відіграє ключову роль у її успішному розвитку. У сучасних умовах неста-

більної економічної ситуації та жорсткої конкуренції у сфері перевезень питання підвищення якості послуг, які надає залізничний транспорт, є вкрай важливим.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Залізничні станції є одним із головних елементів транспортної інфраструктури країни, тому в наш час актуальним завданням є вдосконалення роботи станцій за безумовного забезпечення безпеки руху. Під час вирішення цього завдання необхідно враховувати, що залізничні станції є складною системою і містять велику кількість взаємодіючих елементів, на функціонування яких впливає значна кількість випадкових факторів.

Ефективним інструментом аналізу складних систем будь-якої природи, зокрема технічних, є математичне моделювання, оскільки при цьому з'являється можливість експериментувати не з реальною системою, а з її моделлю, переносячи отримані розрахункові рішення на досліджуваній об'єкт.

Існують універсальні імітаційні системи, розраховані на застосування в багатьох галузях діяльності, а також спеціалізовані, що мають більші можливості для відображення, дозволяють швидше й точніше створювати моделі для конкретних об'єктів та отримувати на них кращий набір результатів.

Значне визнання та застосування отримала імітаційна система ІСТРА [1], яка дозволяє будувати моделі транспортних об'єктів практично будь-якого розміру і складності. Засобом опису модельованого об'єкта в системі є спеціалізована мова моделювання, яка за своєю структурою та можливостями дуже близька до деяких мов програмування. Тому для розробки імітаційної моделі будь-якої залізничної системи дослідник повинен мати певний досвід у комп'ютерному програмуванні.

За кордоном набула поширення універсальна система імітаційного моделювання Arena компанії «Systems Modeling», що дозволяє будувати імітаційні моделі, опробувати їх і проводити аналіз результатів їх роботи. Це найбільш проста універсальна система. В основу моделі покладена система масового обслуговування (СМО), реалізованого в динаміці; при цьому основним результатом моделювання є характеристика черг, що виникають у системі.

Іншою універсальною системою моделювання, яку використовують для побудови імітаційних моделей широкого класу систем, є візуальне об'єктно-орієнтоване середовище з додатним специфічним сервісом eM–Plant Simulation.

У цьому середовищі рухомі об'єкти моделі переміщуються по згенерованій структурі, утворюючи в окремі моменти часу події, які визначаються параметрами об'єктів. За результатами роботи моделі виконують аналіз статистики – продуктивність, час зайнятості обладнання, використання накопичувачів.

Математичний апарат СМО також покладений в основу більшості спеціалізованих закордонних систем моделювання.

Для оптимізації міських транспортних потоків розроблені інструменти PASSER, PROGO, TSDWIN. До числа широко апробованих в інших країнах світу програмних продуктів, призначених для транспортного моделювання, належать пакети Trans Cad, TRPS, CUBE, CATURU, AIMSUN2, DRACULA, VISSIM. Указані моделі в основному використовують для досліджень організації руху в містах, вони вимагають адаптації до моделювання процесів на залізничному транспорті. Існує також досвід створення спеціалізованих систем для моделювання залізничних станцій OpenTrack (Швейцарія) [14], Villon (Словаччина) [11, 12], AnyLogic [8].

Серед вітчизняних розробок слід відзначити спеціалізовану ергатичну систему імітаційного моделювання [2], яка на відміну від наявних систем, дозволяє враховувати вплив людського фактора на процес керування роботою залізничної станції.

Існують також і вузькоспеціалізовані імітаційні комплекси. Одним з них є комплекс для визначення раціональних параметрів сортувального процесу [9], який дозволяє виконувати моделювання процесу розформування составів на сортувальній гірці з урахуванням її конструкції та ефективного режиму роботи маневрового тепловоза.

Відомо, що спеціалізовані імітаційні системи вимагають специфічних знань з їх використання, у більшості випадків є платними або не досить відомими для широкого кола дослідників, що не дозволяє застосовувати ці програмні продукти для вирішення поставлених завдань. У цьому зв'язку більшого розповсюдження в наш час набули універсальні імітаційні системи попри необхідність певного їх доопрацювання й адаптації під конкретний процес.

До числа таких універсальних систем моделювання належить продукт QPNet [15], до ос-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

новних переваг якого, порівняно з подібними програмними комплексами, можна віднести високу продуктивність, наявність вбудованого редактора технологічного процесу, вільний доступ та її подальший розвиток, тобто система продовжує еволюціонувати.

Процес обслуговування об'єктів у транспортній системі в середовищі QPNet представлений мережею Петрі [16] – послідовністю позицій (станів) і переходів. При цьому переходи імітують обробку об'єктів протягом заданого часу, а позиції характеризують поточний стан системи й визначають умови переходів. Під час виконання умов перехід спрацьовує, у результаті чого змінюється поточне розміщення мережі.

У [5] розглянуто можливості використання апарату мереж Петрі для формалізації технології формування залізничних ступінчастих маршрутів із зерновими вантажами. Для моделювання залізничних технологічних процесів перевезень у моделі застосовано гібридні мережі Петрі із синтез-дугами з динамічними вагами. У цій роботі обґрунтовано надання якісних послуг залізничним перевізником в умовах дефіциту зерновозів та тягового рухомого складу за рахунок скорочення загального часу прямування зернових вантажів.

У [13] автори представили практичне застосування моделі функціонування станції на базі мереж Петрі для визначення затримок.

У роботах [6, 10] за допомогою імітаційного моделювання із застосуванням математичного апарату мереж Петрі автори спробували вирішити завдання підвищення ефективності сортувального процесу на сортувальній станції.

Також мережі Петрі використовують і для оптимізації роботи декількох залізничних станцій різного типу. Так, автори роботи [7] розробили імітаційну модель процесу взаємодії сортувальної та припортової станцій із метою пошуку раціональної технології обслуговування експортних вагонопотоків.

Мета

Незважаючи на значну наукову та практичну значимість проблеми вдосконалення роботи залізничних станцій, характер і ступінь впливу розмірів вагонопотоків на смність колійного розвитку та взаємне розташування основних пристроїв на залізничних станціях із позицій

системного підходу вивчені недостатньо. Відсутність універсальної методики виявлення ефективних технічних і технологічних параметрів залізничних станцій визначило мету цього дослідження, яка полягає у встановленні раціональних параметрів залізничної станції на основі імітаційного моделювання її процесу функціонування, що представлений мережею Петрі в середовищі QPNet на основі запропонованої методики техніко-економічного порівняння варіантів.

Методика

Сортувальний комплекс (СК) являє собою одну з головних підсистем залізничної станції, що забезпечує переробку вагонопотоків. До складу СК належать: парк прибуття (П), колії насуву, сортувальна гірка (СГ) та голова сортувального парку. Поїзди в розформування приймають у парк П, після чого на станції виконують ряд технологічних операцій із підготовки составів до розпуску на сортувальній гірці. Однією з основних операцій при цьому є технічне обслуговування (ТО), яке проводить бригада ПТО на коліях парку П. Тривалість ТО є випадковою величиною, яка, з одного боку, залежить від кількості оглядачів у бригаді ПТО та параметрів составів, а з іншої – суттєво впливає на показники функціонування сортувального комплексу та пов'язані з ними експлуатаційні витрати. У цьому зв'язку виникає оптимізаційна задача визначення раціональної кількості оглядачів у бригаді ПТО, за якої б забезпечувався мінімум експлуатаційних витрат. Для розв'язання вказаної задачі СК доцільно розглядати як СМО з випадковим вхідним потоком та випадковою тривалістю обслуговування; при цьому основними показниками функціонування такої системи є:

– кількість вимог в окремий момент часу у стані очікування обслуговування (у черзі) $n_{ч}$, у стані обслуговування $n_{обс}$, загалом у системі $n_{с}$;

– тривалість знаходження окремої вимоги у стані очікування $t_{оч}$, під обслуговуванням $t_{обс}$, у цілому в системі $t_{с}$.

Відомо, що для СМО з найпростішим вхідним потоком і показниковим законом розподілу тривалості обслуговування існують аналітичні вирази для визначення наведених показників

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

[4]. У той же час визначення показників функціонування реальних транспортних об'єктів, як правило, здійснюється шляхом імітаційного моделювання їх роботи. Це пов'язано зі складністю технологічних процесів транспортних об'єктів та їх стохастичним характером.

Технологічний процес функціонування сортувального комплексу формалізується за допомогою мережі Петрі в програмному середовищі QPNet (рис. 1), яке дозволяє будувати мережі Петрі та змінювати параметри їх елементів в інтерактивному режимі, досліджувати функціонування дискретних моделей різної складності, накопичувати та зберігати результати моделювання у файлі, формат якого підтримується програмою для роботи з електронними таблицями MS Excel.

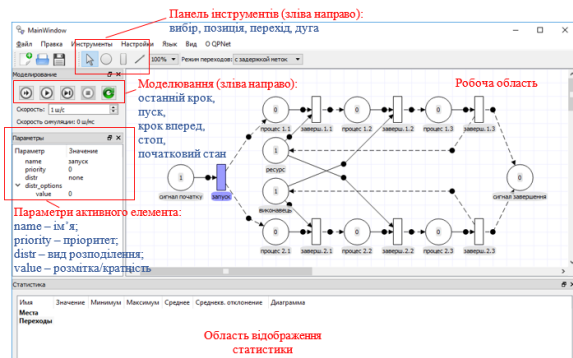


Рис. 1. Головне вікно системи імітаційного моделювання QPNet

Fig. 1. The main window of the QPNet simulation system

Технологічний процес функціонування СК у вигляді часової мережі Петрі представлений на рис. 2. Він складається з таких елементів:

1) позицій, за допомогою яких ведуть облік кількості:

– підхід поїздів – поїздів, що прибудуть на СК;

– очік. ТО – составів в черзі на технічне обслуговування;

– очік. розф. – составів в черзі на розформування на СГ;

– парк прибуття – составів в парку П;

– розформовано составів – розформованих составів за період моделювання;

– вимоги на осаджування – розформованих составів в поточному гірковому циклі.

Крім цього, позиції використовують для контролю зайнятості виконавців:

– бригада ПТО – оглядачів бригади ПТО;

– ман. лок. – гіркового локомотиву.

2) переходів, за допомогою яких виконують моделювання технологічних операцій сортувального комплексу:

– прибуття поїзда – прийом поїздів на СК з інтервалом I ;

– ТО – технічне обслуговування состава на коїях парку П з тривалістю $t_{обс}$;

– розф. – розформування состава на сортувальній гірці з тривалістю t_p ;

– осадж. – осаджування вагонів на коїях сортувального парку з тривалістю $t_{ос}$.

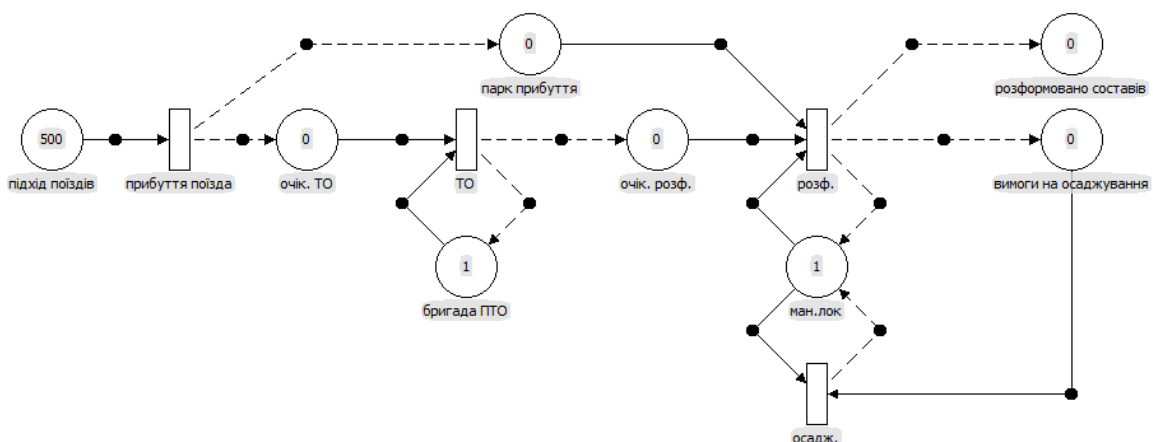


Рис. 2. Модель процесу функціонування сортувального комплексу у вигляді мережі Петрі

Fig. 2. Model of the process of sorting complex functioning in the form of Petri net

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Розглянемо алгоритм функціонування розробленої моделі СК. Позиція «підхід поїздів» є джерелом надходження вимог у систему; при цьому моделювання відбувається до моменту досягнення заданої кількості вимог, які повинні бути обслужені системою, що відповідає кількості міток в даній позиції.

Позиція «підхід поїздів» сполучається з переходом «прибуття поїзда» дугою з кратністю 1, тому цей перехід спрацює в разі наявності в попередній позиції хоча б одної мітки. Система QPNet дозволяє реалізувати часову затримку спрацювання переходу; при цьому можливо задати як детерміновану, так і випадкову тривалість затримки, розподілену за нормальним, експоненціальним або рівномірним законами (рис. 3).

Таким чином, на черговому кроці моделювання за наявності міток у позиції «підхід поїздів» спрацює перехід «прибуття поїзда», який забирає із вказаної позиції одну мітку. Ця мітка затримується в зазначеному переході на задану кількість кроків; при цьому перехід припиняє відбір нових міток на час затримки в ньому чергової мітки. Після вичерпання тривалості затримки перехід віддає мітки в кожну вихідну дугу відповідно до їх кратності. Так, перехід «прибуття поїзда» сполучається з позиціями «очікування ТО» та «парк прибуття» дугами з кратністю 1, тому після спрацювання цього переходу у вказані позиції буде додано по одній мітці. Ці позиції реалізують функцію лічильника кількості вимог у черзі на ТО та в парку П відповідно.

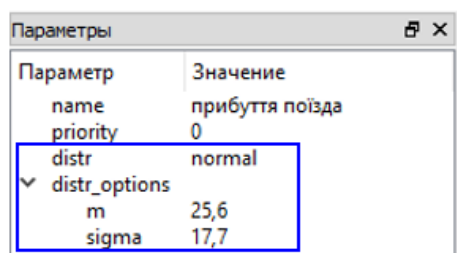


Рис. 3. Вікно вибору параметрів затримки спрацювання переходу

Fig. 3. The window for selecting the parameters of the transition response delay

Перехід «ТО» імітує процес технічного обслуговування состава та має 2 вхідні позиції: «очікування ТО» та «бригада ПТО», які сполу-

чаються з цим переходом дугами з кратністю 1. Тому перехід «ТО» спрацює тільки в тому випадку, коли в обох вхідних позиціях буде мінімум по одній мітці – технічне обслуговування розпочнеться тільки тоді, коли в черзі на обслуговування є хоча б один состав та наявна вільна бригада ПТО. За виконання цієї умови перехід «ТО» забирає з його вхідних позицій по одній мітці та затримує їх проходження аналогічно до переходу «прибуття поїзда». Після спрацювання переходу «ТО» віддає по одній мітці у вихідні позиції-лічильники «бригада ПТО» та «очікування розформування», які обліковують кількість відповідно вільних бригад ПТО та готових до розформування составів.

Перехід «розформування» імітує розформування составів на СГ та має 3 вхідні позиції: «парк прибуття», «очікування розформування» та «маневровий локомотив», які сполучаються з цим переходом дугами з кратністю 1. Відповідно цей перехід спрацює лише у випадку наявності мінімум по 1 мітці в кожній вхідній позиції – розформування почнеться в разі наявності готового состава та вільного гіркового локомотива.

Відомо, що гірковий локомотив може виконувати як насув та розпуск составів, так і проводити осаджування вагонів на сортувальних коліях. У дослідженні взято, що локомотив відволікається на осаджування після розформування $N_{ц}$ составів. Із цією метою в позиції «вимоги до осаджування» ведеться облік кількості составів, розформованих у поточному гірковому циклі. Ця позиція сполучається з переходом «осаджування» дугою, кратність якої дорівнює $N_{ц}$. Перехід «осаджування» імітує процес осаджування вагонів на сортувальних коліях та має пріоритет спрацювання перед іншими переходами (рис. 4).

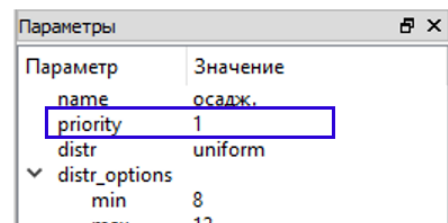


Рис. 4. Вікно для встановлення пріоритету спрацювання переходу

Fig. 4. Window for setting the priority of the transition

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Таким чином, у разі звільнення маневрового локомотива, за наявності в позиції «вимоги до осаджування» $N_{ц}$ міток, спрацює пріоритетний перехід «осаджування», який забере $N_{ц}$ міток із позиції «вимоги до осаджування», скидаючи до нуля лічильник розформованих у циклі составів, та одну мітку з позиції «маневровий локомотив», імітуючи відволікання маневрового локомотива на осаджування. При цьому перехід «розформування» буде заблоковано до моменту завершення затримки спрацювання переходу «осаджування» та подальшого за цим повернення мітки в позицію «маневровий локомотив».

Якщо міток у позиціях мережі недостатньо для спрацювання жодного переходу, моделювання припиняється. Після закінчення моделювання програмне середовище QPNet дозволяє зберегти динаміку зміни кількості міток у кожній позиції у вигляді набору кортежів (крок моделювання; нове значення кількості міток), на основі аналізу яких може бути визначена середня тривалість знаходження вимог $T_{п}$ у парку П.

Слід відзначити, що QPNet має зручний візуальний інструментарій для статистичного аналізу. Використання вказаного інструментарію дозволяє на основі інтегральної функції розподілу випадкової величини кількості вимог у системі (позиція «парк прибуття») визначити потрібну кількість колій Z в парку П із заданою надійністю α (рис. 5).

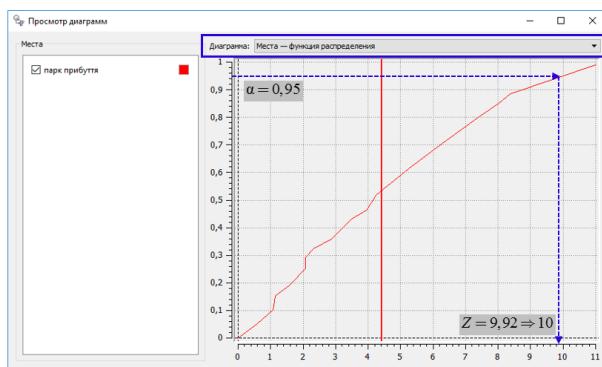


Рис. 5. Вікно з функцією розподілу випадкової величини кількості вимог у системі й потрібною кількістю приймальних колій

Fig. 5. Window with the distribution function of the random variable of the number of requirements in the system and the required number of receiving tracks

Вибір ефективного варіанта оснащення СК може бути здійснений за мінімальною величиною модифікованих зведених витрат (МЗВ), які визначають на основі отриманих результатів моделювання за формулою [3]:

$$\text{МЗВ} = K + (E(1 - \beta) - A\beta) \frac{1 - (1 + d)^{-T}}{d}, \quad (1)$$

де K – капітальні вкладення в оснащення СК, тис. грн; E – щорічні експлуатаційні витрати без урахування амортизаційних відрахувань, тис. грн; A – амортизаційні відрахування, тис. грн; β – норма податку на прибуток; d – мінімальна необхідна норма доходу на капітал; T – тривалість життєвого циклу проекту, років.

Спрощено приймемо, що з постійних пристроїв СК за варіантами буде змінюватись лише кількість приймальних колій. Тоді капітальні вкладення можуть бути визначені так:

$$K = c_k Z \gamma l_{\text{кор}} 10^{-3} + 2c_{\text{сп}}(Z - 1), \quad (2)$$

де Z – кількість колій у парку П; γ – коефіцієнт, який показує відношення повної довжини колії до корисної; $l_{\text{кор}}$ – корисна довжина колії в парку прибуття, м; c_k – вартість будівництва 1 км колії, тис. грн; $c_{\text{сп}}$ – вартість укладання стрілочного переводу, тис. грн.

Амортизаційні відрахування визначають прямолінійним методом за формулою:

$$A = \frac{K}{T}. \quad (3)$$

Щорічні експлуатаційні витрати визначають за формулою:

$$E = E_{\text{пто}} + E_{\text{пп}} + E_{\text{пс}}, \quad (4)$$

де $E_{\text{пто}}$ – витрати на утримання бригади ПТО; $E_{\text{пп}}$ – витрати на утримання колій у парку прибуття; $E_{\text{пс}}$ – витрати, пов'язані з тривалістю перебування составів на СК. Складові частини формули (4) можна знайти так:

– витрати, пов'язані з утриманням бригади ПТО:

$$E_{\text{пто}} = 4,5e_{\text{пто}}K_{\text{гр}}, \quad (5)$$

де $e_{\text{пто}}$ – витрати на утримання однієї групи в бригаді ПТО, тис. грн; $K_{\text{гр}}$ – кількість груп у бригаді ПТО;

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

– витрати, пов'язані з утриманням колій та стрілочних переводів парку П:

$$E_{\text{пп}} = e_{\text{к}} Z I_{\text{коп}} \gamma \cdot 10^{-3} + 2e_{\text{сп}}(Z - 1), \quad (6)$$

де $e_{\text{к}}$ – витрати на утримання 1 км станційних колій, тис. грн; $e_{\text{сп}}$ – витрати на утримання одного стрілочного переводу, тис. грн;

– витрати, пов'язані з тривалістю перебування составів на СК:

$$E_{\text{пс}} = 365 \frac{T_{\text{п}}}{60} e_{\text{в-г}} N_{\text{р}} M[m], \quad (7)$$

де $T_{\text{п}}$ – середня тривалість перебування составів у парку П, хв; $e_{\text{в-г}}$ – вартість однієї вагоно-години простою на станції, грн; $N_{\text{р}}$ – кількість поїздів, які прибувають за добу, яку визначають так:

$$N_{\text{р}} = 1440 / M[I], \quad (8)$$

де $M[I]$ – середній інтервал прибуття поїздів, хв; $M[m]$ – середня кількість вагонів у складі поїзда, ваг.

Результати

Із використанням розробленої моделі в роботі виконано дослідження впливу інтенсивності вхідного потоку поїздів λ на показники функціонування сортувального комплексу. Під час моделювання було взято такі вихідні дані:

– інтервал прибуття поїздів – випадковий, розподілений за експоненціальним законом; величина $M[I]$ варіювалась у межах від 20 до 80 хв;

– тривалість $t_{\text{то}}$ технічного обслуговування – випадкова, розподілена за нормальним законом із параметрами: середнє значення $M[t_{\text{то}}] = \{27,0; 18,7; 14,5\}$ хв, відповідно для $K_{\text{гр}} = \{2; 3; 4\}$ груп; коефіцієнт варіації тривалості обслуговування $v[t_{\text{то}}] = 0,2$;

– тривалість розформування состава $t_{\text{р}}$ на сортувальній гірці – випадкова, розподілена за рівномірним законом у межах $M[t_{\text{р}}] \in [18...22]$ хв;

– тривалість $t_{\text{ос}}$ осаджування вагонів на сортувальних коліях – випадкова, розподілена за рівномірним законом у межах $M[t_{\text{р}}] \in [9...13]$ хв; при цьому осаджування виконується після розформування трьох составів, тобто $N_{\text{ц}} = 3$.

Результати моделювання обслуговування на СК потоку з 500 поїздів представлені в табл. 1; при цьому потрібна кількість приймальних колій Z визначена для рівня надійності $\alpha = 0,95$.

Таблиця 1

Результати моделювання функціонування СК

Table 1

The results of modeling the functioning of the sorting complex

$M[I]$	$K_{\text{гр}} = 2$ групи		$K_{\text{гр}} = 3$ групи		$K_{\text{гр}} = 4$ групи	
	Z , кол.	$T_{\text{п}}$, хв	Z , кол.	$T_{\text{п}}$, хв	Z , кол.	$T_{\text{п}}$, хв
20	114	1654,44	104	1543,61	85	908,14
25	44	781,58	29	370,44	22	197,12
28	25	302,93	18	142,09	10	81,85
30	15	183,96	13	99,01	9	64,19
40	7	55,82	5	39,45	5	36,42
50	5	43,88	4	31,47	4	26,65
60	4	39,95	3	28,05	3	24,42
70	4	39,29	3	25,27	3	22,28
80	3	35,40	3	24,07	3	21,20

Як видно з таблиці, за значної нерівномірності прибуття поїздів, якою характеризується взятий випадковий вхідний потік вимог, розподілений за експоненціальним законом, зі скороченням інтервалу прибуття $M[I]$ у межах від 30 до 20 хв спостерігається інтенсивне зростання потрібної кількості колій Z . Це пояснюється значним рівнем завантаження бригади ПТО та пов'язаним із цим зростанням черги составів Q (рис. 6).

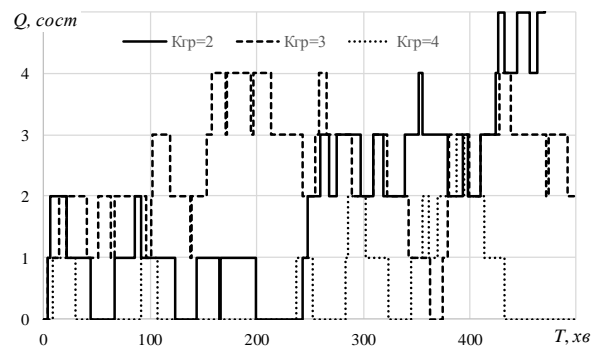


Рис. 6. Динаміка зміни черги составів у парку

Fig. 6. Dynamics of changing the train queue in the yard

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Для економічного обґрунтування ефективного варіанта оснащення СК взято такі вихідні дані: $T = 10$ років; $\beta = 0,18$; $d = 0,15$; $\gamma = 1,1$; $c_K = 2\,000,0$ тис. грн; $c_{сп} = 300,0$ тис. грн.; $e_K = 250,0$ тис. грн; $e_{сп} = 30,0$ тис. грн; $e_{в-г} = 3,0$ грн.; $l_{кор} = 850$ м; $M[m] = 50,0$ ваг.

Значення величини МЗВ за варіантами оснащення сортувального комплексу представлено на рис. 7.

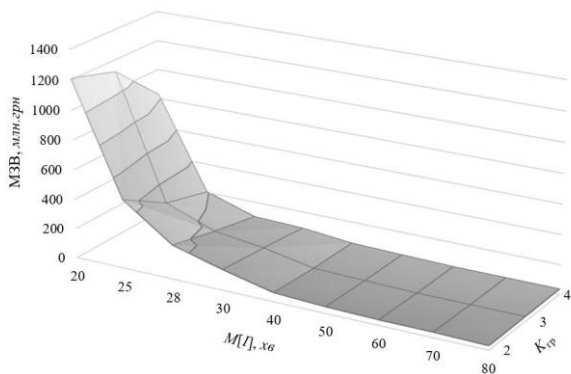


Рис. 7. Модифіковані зведені витрати за варіантами оснащення сортувального комплексу

Fig. 7. Modified summarized costs according to the variants for equipping the sorting complex

За розрахованою величиною МЗВ можна визначити граничні значення інтенсивності вхідного потоку поїздів λ , за яких кожен із розглянутих варіантів оснащення СК є ефективним (рис. 8).

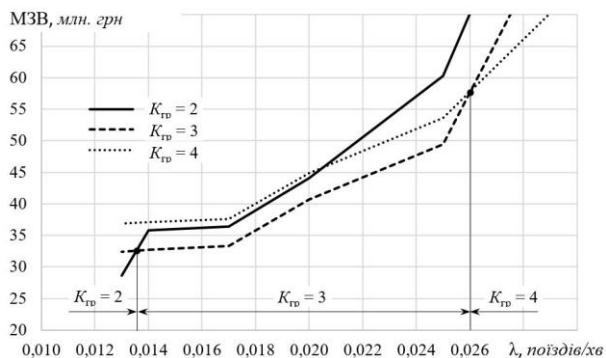


Рис. 8. Ефективність варіантів оснащення СК

Fig. 8. The efficiency of the variants for equipping the sorting complex

Відповідно до графіку на рис. 8 встановлено, що за вхідного потоку до 1 поїзда/год технічний огляд доцільно виконувати двома групами у бригаді ПТО, а понад 2 поїзди/год – чотирма

групами у бригаді ПТО. У випадку, коли вхідний потік коливається в межах 1–2 поїзди/год, раціонально утримувати у бригаді ПТО три групи.

Наукова новизна та практична значимість

Наукова новизна полягає в удосконаленні імітаційної моделі сортувального комплексу, процес функціонування якого представлений часовою мережею Петрі, що, на відміну від інших моделей, дозволяє враховувати додатковий час зайнятості гіркового локомотива іншими операціями, не пов'язаними з розформуванням составів на сортувальній гірці безпосередньо.

Практична значимість представлена у роботі вдосконаленою імітаційною моделлю сортувального комплексу полягає в можливості більш точно враховувати вплив технічного оснащення залізничної станції на показники її функціонування.

Висновки

Виконані в роботі аналіз та дослідження дозволили сформулювати такі висновки.

1. Для визначення достовірних показників функціонування будь-яких транспортних систем доцільно використовувати методи імітаційного моделювання.

2. Серед різноманіття імітаційних систем найбільш популярними є універсальні системи, які, на відміну від спеціалізованих, доступні більш широкому колу попри вимогу певного їх доопрацювання й адаптації під конкретний процес.

3. Запропоновані вдосконалення до часової мережі Петрі, за допомогою якої формалізовано процес функціонування сортувального комплексу, дозволять більш точно враховувати вплив технічного оснащення залізничної станції на показники її функціонування.

4. Розглянуто методику техніко-економічного обґрунтування варіантів оснащення сортувального комплексу.

5. Визначено ефективні техніко-технологічні параметри сортувального комплексу в різних експлуатаційних умовах роботи.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Александров А. Э. *Расчет и оптимизация транспортных систем с использованием моделей (теоретические основы, методология)* : дис. ... д-ра тех. наук : 05.22.08. Екатеринбург, 2008. 232 с.
2. Бобровский В. И., Козаченко Д. Н., Вернигора Р. В., Малашкин В. В. *Функциональное моделирование работы железнодорожных станций* : монография. Днепропетровск : ДНУЖТ, 2015. 269 с.
3. Виленский П. Л., Лившиц В. Н., Смоляк С. А. *Оценка эффективности инвестиционных проектов. Теория и практика*. Москва : Дело, 2004. 888 с.
4. Илесалиев Д. И., Абдувахитов, Ш. Р. Исследования функционирования контейнерного терминала. *Транспорт : Наука, Техника, Управление*. 2019. № 11. С. 59–62.
DOI: <https://doi.org/10.36535/0236-1914-2019-11-11>
5. Ломотько Д. В., Арсененко Д. В. Створення ефективної технології формування залізничних маршрутів із зерновими вантажами за допомогою моделей на мережі Петрі. *ІКСЗТ*. 2018. № 6. С. 38–45.
DOI: <https://doi.org/10.18664/ikszt.voi6.151642>
6. Шаповал Г. В., Шелехань Г. І., Занік І. В. Дослідження впливу поїздоутворення на ефективність сортувального процесу. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2016. № 166. С. 68–78.
DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.166.2016.92849>
7. Шелехань А. І., Продашук М. В. Удосконалення процесу взаємодії сортувальної та припортової станцій при обслуговуванні експортних вагонопотоків. *Збірник наукових праць УкрДУЗТ*. 2017. № 168. С. 10–18. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.168.2017.101565>
8. AnyLogic. *Железнодорожные перевозки*. URL: <https://www.anylogic.ru/rail-logistics/> (дата звернення 05.05.2020).
9. Demchenko E. V. Complex simulation model of train breaking-up process at the humps. *Наука та прогрес транспорту*. 2015. № 6 (60). P. 25–34. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/57003>
10. Dorda M., Teichmann D. Modelling of Freight Trains Classification Using Queueing System Subject to Breakdowns. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013. Vol. 2013. P. 1–11.
DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/307652>
11. Lu Q., Dessouky M., Leachman R. C. Modeling Train Movements through Complex Rail Networks. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS)*. 2004. Vol. 14. Iss. 1. P. 48–75.
DOI: <https://doi.org/10.1145/974734.974737>
12. Márton P., Žarnay M., Wenjian L. *Development of computer simulation model of mudanjiang railway junction and its results*. URL: <http://frdsa.fri.uniza.sk/~zarnay/publications/SimulationTranspSystems/MartonZarnayLi-Zel2003.pdf> (дата звернення 05.05.2020).
13. Milinkovic S., Markovic M., Veskovic S., Ivic M., Pavlovic N. A fuzzy Petri net model to estimate train delays. *Simulation Modelling Practice and Theory*. 2013. Vol. 33. P. 144–157.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2012.12.005>
14. OpenTrack. *Моделирование железнодорожных сетей*. URL: http://www.opentrack.ch/opentrack/downloads/OpenTrack.Info_RU.pdf (дата звернення 05.05.2020).
15. Sourceforge. *QPNet – Synchronous Petri Nets' emulator*. URL: <https://sourceforge.net/projects/qpnet/> (дата звернення 05.05.2020).
16. Zaitsev D. A. *Petri Nets for Modeling and Computing*. 2016. DOI: <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-9594-8>

Е. Б. ДЕМЧЕНКО^{1*}, В. В. МАЛАШКИН^{2*}, И. Я. СКОВРОН^{3*}

^{1*} Каф. «Транспортные узлы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (097) 799 16 75, эл. почта e.b.dmch@gmail.com, ORCID 0000-0003-1411-6744

^{2*} Каф. «Транспортные узлы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 793 19 13, эл. почта viacheslav.malashkin@gmail.com, ORCID 0000-0002-5650-1571

^{3*} Каф. «Транспортные узлы», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (095) 230 50 34, эл. почта norvoks@gmail.com, ORCID 0000-0003-0697-2698

ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕТЕЙ ПЕТРИ

Цель. Эта работа заключается в определении рациональных параметров железнодорожной станции на основе имитационного моделирования её процесса функционирования, представленной сетью Петри в среде QPNet на основе предложенной методики технико-экономического сравнения вариантов. **Методика.** Авторы представили методику формализации процесса функционирования сортировочного комплекса с помощью сети Петри в среде QPNet. Особое внимание уделено формализации работы горочного локомотива. Разработана методика технико-экономического сравнения вариантов оснащения сортировочного комплекса, в основе которой лежит использование модифицированных приведенных расходов. **Результаты.** Авторы выполнили обзор существующих систем имитационного моделирования, которые бывают специализированными и универсальными. Специализированные имеют больше возможности для отображения, позволяют быстрее и точнее создавать модели для конкретных объектов, а также получать с их помощью лучший набор результатов. Вместе с тем большее признание получили именно универсальные системы, не взирая на требование определённой их доработки и адаптации под конкретный процесс, поскольку специализированные имитационные системы являются платными или недостаточно известными, что не позволяет широкому кругу исследователей использовать их для решения поставленных задач. В статье приведены результаты работы сортировочного комплекса при различном оснащении, установленные при моделировании его работы в среде QPNet. Полученные значения технико-технологических параметров сортировочного комплекса стали основой для определения рациональных мероприятий, направленных на повышение эффективности функционирования сортировочной станции в различных эксплуатационных условиях её работы. **Научная новизна.** Усовершенствовано имитационную модель сортировочного комплекса, процесс функционирования которого представлен временной сетью Петри, что, в отличие от других моделей, позволяет учитывать дополнительное время занятости горочного локомотива другими операциями, не связанными непосредственно с расформированием составов на сортировочной горке. **Практическая значимость.** Представленная в работе усовершенствованная имитационная модель сортировочного комплекса дает возможности более точно учитывать влияние технического оснащения железнодорожной станции на показатели её функционирования.

Ключевые слова: железнодорожная станция; имитационное моделирование; сеть Петри; оснащение станции; среда QPNet

Y. B. DEMCHENKO^{1*}, V. V. MALASHKIN^{2*}, I. Y. SKOVRON^{3*}

^{1*}Dep. «Stations and Junctions», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (097) 799 16 75, e-mail e.b.dmch@gmail.com, ORCID 0000-0003-1411-6744

^{2*}Dep. «Stations and Junctions», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 793 19 13, e-mail viacheslav.malashkin@gmail.com, ORCID 0000-0002-5650-1571

^{3*}Dep. «Stations and Junctions», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (095) 230 50 34, e-mail norvoks@gmail.com, ORCID 0000-0003-0697-2698

INVESTIGATION OF THE PARAMETERS OF RAILWAY STATIONS USING PETRI NETS

Purpose. The work is aimed to determine the rational parameters of a railway station based on the simulation modeling of its functioning process, presented by the Petri net in QPNet using the proposed methodology of technical and economic comparison of equipment options. **Methodology.** The authors presented a methodology for formalizing the functioning of the sorting complex using a Petri net in QPNet. Particular attention is paid to the formalization of the operation of the hump locomotive. Methodology of technical and economic comparison of equipment options for the sorting complex was developed. It is based on the use of modified summarized costs. **Findings.** The authors performed a review of existing simulation systems, which can be specialized and universal. Specialized ones

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

have richer display capabilities, allow you to create models for specific objects faster and more accurately, and as a result you can get the best set of results with their help. At the same time, the universal systems gained greater recognition, despite the requirement of some refinement and adaptation to a specific process, since specialized simulation systems are paid or insufficiently advertised, which does not allow a wide circle of researchers to use them to solve the set tasks. The paper presents the operation results of sorting complex with various equipment, obtained by simulation in the QPNet. The obtained values of the technical and technological parameters of the sorting complex became the basis for determining rational measures aimed at improving the efficiency of the sorting station in various operating conditions. **Originality** lies in improving the simulation model of the sorting complex which functioning is represented by the temporary Petri net. This, unlike other models, allows you to take into account the additional time of hump locomotive occupation by other operations not directly related with trains breaking-up. **Practical value** of the improved simulation model of the sorting complex presented in the work lies in the ability to more accurately take into account the influence of the technical equipment parameters of the railway station on its performance.

Keywords: railway station; simulation modeling; Petri net; station equipment; QPNet

REFERENCES

1. Aleksandrov, A. E. (2008). *Raschet i optimizatsiya transportnykh sistem s ispolzovaniem modeley (teoreticheskie osnovy, metodologiya)*. (Doctoral dissertation). Ekaterinburg. (in Russian)
2. Bobrovskiy, V. I., Kozachenko, D. N., Vernigora, R. V., & Malashkin, V. V. (2015). *Functional modeling of the work of railway stations: monografiya*. Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan. (in Russian)
3. Vilenskiy, P. L., Livshits, V. N., & Smolyak, S. A. *Otsenka effektivnosti investitsionnykh proektov. Teoriya i praktika*. Moscow: Delo. (in Russian)
4. Ilesaliev, D. I., & Abduvahitov, Sh. R. (2019). Research functioning container terminal. *Transport : science, equipment, management*, 11, 59-62. DOI: <https://doi.org/10.36535/0236-1914-2019-11-11> (in Russian)
5. Lomotko, D. V., & Arsenenko, D. V. (2018). Creating an effective technology for the formation railway routes with grain cargoes using models on the Petri net. *Information and Control Systems on Railway Transport*, 6, 38-45. DOI: <https://doi.org/10.18664/ikszt.v0i6.151642> (in Ukrainian)
6. Shapoval, G. V., Shelekhan, G. I., & Zanik, I. V. (2016). Research of the train formation influence on the sorting process efficiency. *Collection of Scientific Works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, 166, 68-78. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.166.2016.92849> (in Ukrainian)
7. Shelekhan, A. I., & Prodaschuk, M. V. (2017). Improvement of the interaction process of marshalling yards and portside stations at the service of exporting traffic volumes. *Collection of Scientific Works of the Ukrainian State University of Railway Transport*, 168, 10-18. DOI: <https://doi.org/10.18664/1994-7852.168.2017.101565> (in Ukrainian)
8. AnyLogic. *Rail simulation software*. Retrieved from <https://www.anylogic.ru/rail-logistics> (in Russian)
9. Demchenko, E. B. (2015). Complex simulation model of train breaking-up process at the humps. *Science and Transport Progress*, 6(60), 25-34. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/57003> (in English)
10. Dorda, M., & Teichmann, D. (2013). Modelling of Freight Trains Classification Using Queuing System Subject to Breakdowns. *Mathematical Problems in Engineering*, 2013, 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1155/2013/307652> (in English)
11. Lu, Q., Dessouky, M., & Leachman, R. C. (2004). Modeling train movements through complex rail networks. *ACM Transactions on Modeling and Computer Simulation (TOMACS)*, 14(1), 48-75. DOI: <https://doi.org/10.1145/974734.974737> (in English)
12. Márton, P., Žarnay, M., & Wenjian, L. (2014). *Development of computer simulation model of Mudanjiang railway junction and its results*. Retrieved from <http://frdsa.fri.uniza.sk/~zarnay/publications/SimulationTranspSystems/MartonZarnayLi-Zel2003.pdf> (in English)
13. Milinković, S., Marković, M., Vesković, S., Ivić, M., & Pavlović, N. (2013). A fuzzy Petri net model to estimate train delays. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 33, 144-157. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.simpat.2012.12.005> (in English)
14. OpenTrack. *Modelirovanie zheleznodorozhnykh setey*. Retrieved from http://www.opentrack.ch/opentrack/downloads/OpenTrack.Info_RU.pdf. (in Russian)

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

15. Sourceforge. *QPNet–Synchronous Petri Nets' emulator*. Retrieved from <https://sourceforge.net/projects/qpnet> (in English)
16. Zaitsev, D. A. (2016). *Petri Nets for Modeling and Computing*.
DOI: <https://doi.org/10.4018/978-1-4666-9594-8> (in English)

Надійшла до редколегії: 31.01.2020

Прийнята до друку: 05.06.2020

УДК 656.222

Д. Н. КОЗАЧЕНКО^{1*}, А. Ю. ПАПАХОВ^{2*}, Ю. Н. ГЕРМАНЮК^{3*}

^{1*}Каф. «Управление эксплуатационной работой», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, эл. почта kozachenko@upr.dit.edu.ua, ORCID 0000-0003-2611-1350

^{2*}Каф. «Управление эксплуатационной работой», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, эл. почта papahova0362@gmail.com, ORCID 0000-0003-2357-8158

^{3*}Каф. «Транспортные технологии», Львовский филиал Днепропетровского национального университета железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. И. Блажкевич, 12а, Львов, Украина, 79000, тел. +30 (032) 267 99 74, эл. почта yuhermanyuk@gmail.com, ORCID 0000-0002-4905-8313

РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОРГАНИЗАЦИИ ВАГОНОПОТОКОВ В РОССИЙСКОЙ ИМПЕРИИ И СССР

Цель. Основной целью этой статьи является исследование развития методов организации вагонопотоков в поезда на железных дорогах Российской империи и СССР. **Методика.** Исследования выполнены на основании анализа литературных источников и методов теории организации эксплуатационной работы железных дорог. **Результаты.** Методы организации вагонопотоков прошли значительный путь развития под влиянием изменений условий работы железнодорожного транспорта, формирования технических средств управления им и математических методов оптимизации. Возникновение научных методов организации вагонопотоков в поезда относится ко временам Российской империи. Современный подход к организации вагонопотоков, базирующийся на плане формирования поездов, развивался в СССР в 1931–1945 гг. Целью внедрения плана формирования поездов было снижение расходов железных дорог на выполнение перевозок грузов. Условиями реализации такого подхода является то, что железные дороги вертикально интегрированы: они одновременно и эксплуатируют железнодорожную инфраструктуру, и являются перевозчиком, выполняющим перевозки грузов в своих вагонах, при этом конкуренция между видами транспорта за грузопотоки отсутствует. Формирование современных методов решения задачи организации вагонопотоков в основном было осуществлено в 1945–1952 гг. В основу этих методов положено разделение задачи организации вагонопотоков в поезда на отдельные подзадачи и последовательное их решение в детерминированной и статической постановке. Практически задача организации вагонопотоков на железных дорогах СССР была решена в 1970–1980-х гг. с помощью ЭВМ. Переход Украины к рыночной модели экономики привел к существенному изменению условий работы железнодорожного транспорта, что требует пересмотра принципов организации вагонопотоков в поезда. **Научная новизна.** В работе впервые на основании исторического анализа развития методов организации вагонопотоков на железных дорогах Российской империи и СССР установлены связи между условиями работы железнодорожного транспорта и методами организации вагонопотоков в поезда. **Практическая значимость.** Ценность результатов для практики состоит в том, что они указывают на необходимость изменения в Украине системы организации вагонопотоков в соответствии с нынешними условиями работы железнодорожного транспорта и выбранным направлением реформирования рынка железнодорожных перевозок.

Ключевые слова: железнодорожный транспорт; организация вагонопотоков; план формирования поездов; накопление вагонов

Введение

Железнодорожный транспорт является одной из базовых отраслей экономики Украины. Он обеспечивает ее внутренние и внешние транспортно-экономические связи, а также удовлетворяет потребности населения в перевозках. К преимуществам железнодорожного транспорта относятся низкая себестоимость пе-

ревозок и высокая пропускная и провозная способность инфраструктуры. Указанные особенности важны для экономики Украины, так как она в основном ориентирована на сырьевой экспорт, а величина транспортных расходов существенно влияет на конечную стоимость отечественных товаров на мировом рынке. Одним из основных факторов, определяющих се-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

бестоимость железнодорожных перевозок, является порядок организации вагонопотоков, который устанавливается планом формирования поездов. Основные методы организации вагонопотоков в поезда, которые используют на железных дорогах Украины, были заложены еще во времена Российской империи и СССР. После обретения Украиной независимости произошли существенные изменения в условиях работы ее железнодорожного транспорта, в связи с чем возникает все больший разрыв между принципами, заложенными в методику разработки плана формирования поездов, и реальными условиями эксплуатации железнодорожного транспорта. Это отражается в большом количестве оперативных вмешательств в процесс поездообразования, неэффективном использовании инфраструктуры и подвижного состава железнодорожного транспорта. Поэтому научная проблема развития теоретических основ организации вагонопотоков в поезда является актуальной для железнодорожного транспорта [38, 44, 53]. В частности, актуальной задачей является исследование истории развития методов организации вагонопотоков.

Цель

Основной целью этой статьи является исследование развития методов организации вагонопотоков в поезда на железных дорогах Российской империи и СССР. Это первая часть исследования, в продолжение которого будет опубликован анализ современных работ по организации вагонопотоков на железных дорогах Украины и других государств – бывших республик СССР.

Методика

Система организации вагонопотоков в грузовые поезда и их направления по определенным маршрутам должна обеспечивать стабильность функционирования железных дорог на рынке транспортных услуг, минимальные расходы на перевозку, соблюдение сроков доставки грузов, а также удовлетворение запросов грузоотправителей и грузополучателей [17]. Основу организации вагонопотоков составляет порядок направления их и организация в грузовые поезда (план формирования поездов), ко-

торый определяет категорию и назначения поездов и групп вагонов, формируемых на станциях. Порядок организации вагонопотоков в поезда существенно влияет на себестоимость железнодорожных перевозок, определяет уровень загрузки технических средств железнодорожного транспорта, а также обеспечивает распределение сортировочной и маневровой работы между станциями и пунктами отправления и назначения грузовых поездов.

Исследования в данной статье выполнены на основании анализа литературных источников и методов теории организации эксплуатационной работы железных дорог. Необходимо также отметить, что изучение проблемы организации вагонопотоков имеет более чем 100-летнюю историю, и в течение этого времени опубликовано значительное число работ по истории развития методов ее решения, прежде всего [44, 46], а также по деятельности отдельных ученых [60], труды которых содержат дополнительную информацию по сути вопроса.

Результаты

Возникновение специализации грузовых поездов. Специализация грузовых поездов на железных дорогах Российской империи возникла на начальном этапе развития железнодорожного транспорта в связи с увеличением объемов перевозок, развитием железнодорожной сети, необходимостью повышения эффективности использования грузовых вагонов и качества услуг железнодорожного транспорта.

Первая железная дорога в Российской империи была построена в 1837 году по маршруту Санкт-Петербург – Царское село. В 1840-е годы была построена Николаевская железная дорога, соединившая два крупнейших города империи – Санкт-Петербург и Москву. На начальном этапе развитие железнодорожного транспорта происходило преимущественно за счет частного капитала, и в 1885 году в частной собственности находилось около 90 % железных дорог Российской империи. В первые десятилетия прием грузов к перевозке выполняли только в пределах одной железной дороги, и подвижной состав обращался исключительно в пределах своих железных дорог. Специализация поездов в то время отсутствовала, и в их составы

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

включали вагони любых назначений, следующих в одном направлении. Учитывая малую протяженность отдельных железных дорог и низкую интенсивность перевозок, такой подход к организации вагонопотоков на них был вполне приемлемым.

Изначально появление специализации поездов было связано с необходимостью обеспечения разной скорости перевозок. В 60-е годы XIX века все поезда делились на быстрые и медленные. К быстрым относились поезда для перевозки пассажиров и багажа. В них также перевозили экипажи (кареты) и животных (лошадей). Медленными являлись грузовые (товарные) поезда. К концу 1860-х годов возникла потребность в ускоренной доставке скоропортящихся грузов. В результате на железных дорогах появились товарные ускоренные и сквозные поезда. В 1880-х годах появились сборные поезда, которые имели многогруппный состав с подборкой групп вагонов по станциям участка. К концу XIX века формирование составов осуществлялось с учетом общего направления следования и специализации поездов. Увеличение размеров сети, объемов и дальности перевозок создало предпосылки и потребность в совместной эксплуатации вагонов и централизации управления железными дорогами.

В 80-х годах XIX века по инициативе Александра III на условиях выкупа началась национализация железных дорог, и к 1900 году 70 % сети уже были государственными. К началу 1890-х годов была утверждена государственная монополия на железнодорожные тарифы, а в правления железнодорожных обществ, имевших долг казне, стали вводить представителей Министерства финансов на правах правительственных директоров. Это привело к слиянию железных дорог в достаточно крупные объединения и образованию железнодорожных обществ государственно-монополистического характера. В результате в конце XIX века в Российской империи сложились условия для совершенствования организации перевозок грузов на основе централизации управления.

Система организации перевозок того времени базировалась на прямом и безперегрузочном использовании вагонов, внедрении общего гра-

фика движения поездов и специализации поездов в графике. Также во времена Российской империи сформировалась система организации движения на железнодорожном транспорте, когда пассажирские поезда движутся по расписанию, а грузовые следуют без его соблюдения. Такая система была унаследована железными дорогами СССР и сохранилась до настоящего времени. Движение преимущественной части грузовых поездов без расписания является отличительной чертой работы железных дорог государств – бывших республик СССР от железных дорог государств Европейского Союза, где движение как пассажирских, так и грузовых поездов выполняется по расписанию.

К 1914 году на большинстве железных дорог Российской империи сложилась следующая специализация грузовых поездов [46]:

- ускоренные воинские и товарные поезда;
- транзитные поезда (поезда дальнего хода);
- участковые поезда;
- сборные поезда, иногда разделяющиеся на сборные поезда дневного и ночного обращения.

Публикации времен Российской империи конца XIX – начала XX века преимущественно были направлены на обобщение практического опыта и представление новых идей по совершенствованию эксплуатационной работы железных дорог, в частности в области организации вагонопотоков. К таким работам относятся: статья И. Рихтера [54], в которой автор обосновывает необходимость специализации поездов; статья А. Краузе [26], где приведены принципы специализации поездов; статья А. Н. Фролова [65], в которой рассмотрена связь между специализацией поездов и простоем вагонов под накоплением; статьи К. Аргинского [2] и А. Н. Фролова [66, 68], в которых выдвинута идея отправительской маршрутизации, и др.

Первые в мире научные исследования и публикации по проблеме организации вагонопотоков в поезда выполнены инженером, а впоследствии профессором А. Н. Фроловым. В 1902 году представлен, а 1903 году опубликовал [67, 69] результаты теоретических исследований проблем организации вагонопотоков и распределения сортировочной работы между техническими станциями железных дорог. В этих работах была установлена зависимость между средним про-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

стоєм вагонів под накоплением в сортировочном парке T , числом формирюемых назначений поездов k и числом перерабатываемых вагонов N :

$$T = \frac{12k}{N},$$

а также выражение для оценки среднего времени простоя вагона отдельного назначения x :

$$\tau_{\text{нак}}^x = \frac{12}{N_{\text{отпр}}^x},$$

где $N_{\text{отпр}}^x$ – число формирюемых в течение суток поездов x -го назначения.

Необходимо отметить, что в первом десятилетии XX века наука об эксплуатационной работе железных дорог только зарождалась, и одним из ее основоположников был А. Н. Фролов. Поэтому те или иные задачи организации вагонопотоков он поднимает в разных статьях. Специальному анализу научного наследия профессора А. Н. Фролова посвящена работа [60].

В 1910 году Д. М. Карамышев в работе [20] опубликовал результаты исследований процесса накопления вагонов на станциях на основе графического моделирования. В этой работе была установлена связь между расписаниями прибытия и отправления поездов на станцию, с одной стороны, и простоем вагонов на ней – с другой. Следует отметить, что сам метод графического моделирования для исследования процесса накопления вагонов на станциях применяют и до настоящего времени.

К периоду Российской империи относятся также и работы В. А. Соковича. В частности, в работе [56] он предложил определять среднее время простоя вагонов в накоплении по формуле:

$$T = \frac{12(k-1)m}{n},$$

где m – состав поезда; n – суточный вагонопоток.

Анализ публикаций по проблеме организации вагонопотоков на железных дорогах в период Российской империи приведен в табл. 1.

Таблица 1

Публикации по проблеме организации вагонопотоков на железных дорогах в период Российской империи

Table 1

Publications on the organization of car traffic volumes at railways during the Russian Empire period

№ п/п	Год	Автор (ы)	Содержание	Ссылки
1	1883	Рихтер И. И.	Ранняя работа с обоснованием необходимости специализации поездов	[54]
2	1894	Краузе А.	Ранняя работа с описанием принципов специализации поездов в Российской империи	[14]
3	1901	Фролов А. Н.	В работе установлена связь между специализацией поездов и простоем под накоплением	[65]
4	1903–1906	Аргинский К., Фролов А. Н.	Ранние работы о целесообразности отправительской маршрутизации перевозок	[2, 66, 68]
5	1902–1903	Фролов А. Н.	Первые научные работы по организации вагонопотоков в поезда. Установлена зависимость между средним простоем вагонов под накоплением в сортировочном парке и числом формирюемых назначений поездов	[67, 69]
6	1910	Карамышев Д.М.	В работе установлено влияние графика движения поездов на простои вагонов в накоплении	[20]
7	1916	Сокович В. А.	В работе усовершенствована формула для оценки величины простоя вагонов в накоплении	[56]

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Таким образом, при эксплуатации железных дорог Российской империи появилось понятие специализации грузовых поездов, а также было сформировано понимание того, что эта специализация оказывает влияние на условия работы как сети в целом, так и отдельных железнодорожных станций. Организация вагонопотоков в поезда в Российской империи осуществлялась на основании практического опыта, без применения научных методов. В научном плане во времена Российской империи началось становление методов оценки вариантов организации вагонопотоков.

Формирование методов оценки вариантов организации вагонопотоков. Дальнейшие исследования, направленные на решение проблемы организации вагонопотоков, были выполнены уже во времена СССР. Основной задачей, стоявшей перед Советским Союзом в период от его создания до момента вступления во Вторую мировую войну, была индустриализация экономики страны. С 1925 по 1934 год наблюдался трехкратный рост грузооборота железнодорожного транспорта с 68,9 млрд ткм до 205,7 млрд ткм, и железнодорожный транспорт стал одной из отраслей, сдерживающих дальнейшее развитие экономики страны. В этих условиях основным направлением научных исследований по проблеме организации вагонопотоков стало изучение процесса поездообразования на станциях и нормирование простоя вагонов под накоплением на них.

Для оценки величины простоя вагонов в накоплении в 20-е годы XX века использовались формулы проф. А. Н. Фролова [67, 69] и В. А. Соковича [54]. Кроме этого, в то время появляются и исследования других авторов, прежде всего проф. И. И. Васильева. Согласно [32], проф. И. И. Васильев в 1925 году в «Трудах XXI съезда службы Эксплуатации» опубликовал формулу для оценки среднего простоя вагонов в сортировочном парке:

$$T_{\text{нак}} = 12 \frac{m-1}{N}.$$

Обзор ранних формул для оценки среднего простоя вагонов в накоплении, в частности формул профессоров А. Н. Фролова, В. А. Соковича, И. И. Васильева, инженеров С. И. Нейштадта,

В. Д. Ещенко, выполнен в работе В. С. Ларионова [32]. В этой же работе В. С. Ларионов осуществил критический анализ этих формул на предмет их соответствия реальному процессу накопления, а также предложил свою формулу.

В середине 30-х годов XX века железнодорожная транспортная система СССР исчерпала свою провозную способность. В 1934 году рост промышленного производства к уровню 1919 года составил 240 %, а железнодорожного транспорта – лишь 170 %. В этих условиях планы перевозки грузов не выполнялись, в частности план на 1934 год был определен в 352 млн тонн, а перевезено лишь 316 млн. В 1934 году директор Научно-исследовательского института эксплуатации Народного комиссариата путей сообщения (НКПС) С. И. Нейштадт в журнале «Эксплуатация железных дорог» издал статью [39], в которой указано, что причиной неустойчивой работы железнодорожного транспорта является достижение предела его провозных возможностей. В 1935 году вышел приказ НКПС № 99/Ц «Об антигосударственной линии в работе Научно-исследовательского института эксплуатации и отдела восточных дорог эксплуатационного управления НКПС». В нем говорилось, что деятельность института и отдела идет вразрез с решениями партии, а их руководящие работники «составили группу, задавшуюся целью обосновать невозможность ускорения оборота вагонов, и тем самым выполнения государственного плана перевозок». В этих условиях вопрос повышения производительности вагонов, в том числе за счет сокращения простоя в накоплении, был в значительной мере идеологизирован в рамках борьбы с последователями «теории предела». Формула для оценки величины простоя вагонов под накоплением подвергалась резкой критике в публикациях, в частности [36]. Несмотря на то что в [36] сравнение условий работы железных дорог при формировании поездов выполнено некорректно, все же нужно отметить, что к концу 30-х годов XX века был накоплен практический опыт, который указывал на то, что продолжительность среднего простоя вагонов в сортировочном парке должна быть меньше, чем определяемая по существующим на тот момент формулам. В 1938 году Научно-исследовательский институт железнодорожного транспорта предложил формулу:

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

$$T_{\text{нак}} = 10m.$$

Согласно [9], коэффициент 10 в данном выражении был принят на основании практического опыта.

В 1941 году проф. И. И. Васильев вновь пересмотрел формулу для оценки простоя вагонов отдельного назначения под накоплением и представил ее в виде [9]:

$$T_{\text{нак}} = 12 \left(\frac{m}{N} - \frac{1}{n_{\text{пр}}} \right),$$

где $n_{\text{пр}}$ – число поездов в сутки, с которыми прибывают вагоны данного назначения.

Дальнейшее совершенствование формулы для оценки простоя вагонов в накоплении произошло по окончании Второй мировой войны. В 1946 году в работе [5] проф. К. А. Бернгард рекомендовал формулу для определения затрат вагоно-часов на накопление на одно назначение при поступлении вагонов группами равномерно в течение суток и при наличии перерывов в накоплении после прибытия отдельных замыкающих групп:

$$T_{\text{нак}} = 12m \left(1 - \frac{1}{e\gamma} \right), \quad (1)$$

где m – число вагонов в составе поезда; e – число групп, из которых накапливается один состав; γ – коэффициент кратности состава и группы.

Выражение (1) может также быть представлено как

$$T_{\text{нак}} = cm, \quad (2)$$

здесь величина

$$c = 12 \left(1 - \frac{1}{e\gamma} \right) \quad (3)$$

названа расчетным коэффициентом накопления.

Выражения (2) и (3) были рекомендованы для целей нормирования простоев вагонов под накоплением на отдельных станциях. Сложность практического применения формулы (3) связана с наличием в ней параметров e и γ , значения которых до разработки плана формирования поездов неизвестны.

Для преодоления этой проблемы А. П. Петров выполнил исследование процесса накопления вагонов [46]. В результате предложено изменить понятие коэффициент накопления на параметр накопления и определять его в зависимости от числа назначений поездов k , которое формируют на станции:

$$c = 12 \left(1 - \frac{2}{k+5} \right).$$

Указанную формулу в виде

$$c = 12 \left(1 - \frac{2}{k+A} \right)$$

используют для практических расчетов и до настоящего времени.

Выделение струи вагонопотока в отдельное назначение требует дополнительных затрат времени на станции формирования, в то же время сокращает простой вагонов этого назначения на попутных технических станциях. Оценка затрат станций, связанных с переработкой вагонопотока, в ранних работах, таких как [32], выполняли на основании непосредственного расчета затрат времени на маневровую работу. Такой подход приемлем для сравнения отдельных вариантов организации вагонопотоков, однако является весьма громоздким для решения задач разработки планов формирования поездов на направлениях и на сети железных дорог.

Согласно [46], в 1927 году в № 1 и 2 журнала «Железнодорожное дело. Эксплуатация» проф. И. И. Васильев предложил формулу для определения экономии $t_{\text{эк}}$ в вагоно-часах на 1 вагон при проследовании транзитного поезда через техническую станцию без переработки в виде

$$t_{\text{эк}} = \alpha (t_{\text{пр}} + t_{\text{рас}} + t_{\text{ф}} + t_{\text{от}}) - t_{\text{тр}},$$

или

$$t_{\text{эк}} = t_{\text{факт}} - \frac{12m}{N} - t_{\text{тр}},$$

где α – коэффициент увеличения на непроизводительные простои, $\alpha = 1,5$; $t_{\text{пр}}$, $t_{\text{рас}}$, $t_{\text{ф}}$, $t_{\text{от}}$ – продолжительность операций по прибытию, расформированию, формированию и отправлению соответственно; $t_{\text{тр}}$ – простой на станции транзитного поезда; $t_{\text{факт}}$ – фактический простой на

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

станції вагона с переработкой; $\frac{12m}{N}$ – средний простой под накоплением.

Также в [46] указано, что в более ранних расчетах 1926 года проф. И. И. Васильев при определении величины экономии от проследования станции транзитным вагоном без переработки величину простоя под накоплением не исключал.

В работе К. А. Бернгарда и др. 1948 года [4] для оценки экономии вагоно-часов на один вагон использовано выражение:

$$t_{\text{эк}} = t_{\text{пер}} - t_{\text{тр}} - t_{\text{нак}}. \quad (4)$$

В течение следующего десятилетия произошло уточнение выражения (4). В [46], а также в томе 13 «Технического справочника железнодорожника» 1956 года [61] А. П. Петров указывает, что устранение переработки вагонов на станциях приводит не только к сокращению оборота вагонов, но и к уменьшению объемов маневровой работы по переработке вагонов на технических станциях. Эту разницу предложено учитывать с помощью выраженного в часах эквивалента стоимости переработки вагона по отношению к стоимости часа простоя r . Аналогичная формула приведена в учебнике Ф. П. Кочнева и др. 1958 года [24] и в работе инж. С. Г. Стопичева 1959 года [59]. В [14] величину r рекомендуют принимать равной 1,3–1,5.

В учебнике Ф. П. Кочнева и др. 1963 года [25] экономию от проследования станции без переработки оценивают уже с учетом затрат, связанных как с переработкой вагонов, так и перецепкой локомотивов:

$$t_{\text{эк}} = t_{\text{эк}}^{\text{бп}} + \mathcal{E} + t_{\text{эк}}^{\text{л}} + t_{\text{эк}}^{\text{бр}}, \quad (5)$$

где \mathcal{E} – эквивалент переработки вагонов, ч; $t_{\text{эк}}^{\text{л}}$, $t_{\text{эк}}^{\text{бр}}$ – эквиваленты экономии простоя поездов локомотивов и локомотивных бригад соответственно, выраженные в стоимости простоя вагоно-часа без переработки.

Аналогичное (5) выражение применяют для оценки экономии от проследования станции без переработки и в настоящее время.

Анализ публикаций по проблеме формирования методов оценки вариантов организации вагонопотоков приведен в табл. 2.

Разработанная методика ориентирована на снижение общих расходов железных дорог, связанных с эксплуатацией станционной инфраструктуры в процессе расформирования–формирования поездов и эксплуатацией подвижного состава при выполнении перевозки. Условиями реализации такого подхода является то, что железные дороги вертикально интегрированы: они одновременно и эксплуатируют железнодорожную инфраструктуру на станциях, и являются перевозчиком, выполняющим перевозки грузов в своих вагонах. Также необходимо отметить, что к 50-м годам XX века в СССР окончательно произошел отказ от составления плана формирования поездов по критерию срока доставки грузов и даже от выполнения контроля его соблюдения при разработке плана формирования поездов. В условиях плановой экономики распределение грузопотоков между видами транспорта осуществляли централизованно исходя из достижения максимального общего эффекта для экономики страны. Более того, размеры СССР позволяли железнодорожному и его основному конкуренту – автомобильному транспорту – занимать разные ниши на рынке перевозок. Поэтому конкуренция на транспортном рынке отсутствовала, и для железнодорожного транспорта более важной задачей было снижение себестоимости перевозок, чем повышение скорости доставки грузов.

Развитие методов решения задачи поиска оптимального плана формирования однопутных сквозных поездов. Методы решения задачи организации вагонопотоков в поезда сформировались во времена Советского Союза. Одной из основных задач организации вагонопотоков является задача поиска оптимального плана формирования однопутных сквозных поездов. Эта задача имеет комбинаторный характер. Число практически применимых вариантов плана формирования однопутных поездов в соответствии с [46] определяют выражением:

$$K_{\text{пф}} = 2^{\frac{k_{\text{ст}}(k_{\text{ст}}-1)(k_{\text{ст}}-2)}{2}},$$

где $k_{\text{ст}}$ – число станций на направлении, для которых рассчитывают план формирования.

Таблица 2

Публикации, связанные с развитием методов оценки вариантов организации вагонопотоков

Table 2

Publications related to the development of methods for assessing the organization of car traffic volumes

№ п/п	Год	Автор (ы)	Содержание	Примечания и ссылки
1	1902–1916	Фролов А. Н., Сокович В. А.	Первые формулы для оценки простоя вагонов	[67, 69, 56]
2	1925–1941	Васильев И. И., Сокович В. А. и др., Нейштадт С. И., Ещенко В. Д., Ларионов В. С.	Совершенствование формулы для оценки простоя вагонов под накоплением	[32, 9, 58], а также согласно [46]
3	1927	Васильев И. И.	Предложена формула для оценки экономии в вагоно-часах при проследовании транзитного поезда через техническую станцию без переработки	Согласно [46]
4	1946	Бернгард К. А.	Формула для оценки простоя вагонов под накоплением, учитывающая дискретный характер поступления вагонов и перерывы в процессе накопления	[3]
5	1948–1959	Бернгард К. А., Забелло М. Л., Шулько В. П., Кочнев Ф. П. и др., Стопичев С. Г.	Приведены усовершенствованные формулы для оценки экономии в вагоно-часах при проследовании транзитного поезда через техническую станцию без переработки	[4, 61, 24, 59]
6	1950	Петров А. П.	Современная формула для оценки простоя вагонов под накоплением	[46]
7	1963	Кочнев Ф. П. и др.	Современная формула для оценки экономии от проследования станции без переработки	[25]

Анализ данной формулы показывает, что число вариантов плана формирования поездов резко возрастает с увеличением числа станций $k_{ст}$. Это и обуславливает сложность задачи.

На начальном этапе задачу организации вагонопотоков рассматривали с позиции перераспределения сортировочной работы между отдельными станциями. В 1921 году А. Н. Фролов впервые выполнил сравнение вариантов распределения сортировочной работы между двумя станциями [70]. В качестве показателей для оценки вариантов были использованы затраты вагоно- и паровозо-суток. В работе [35] оценку вариантов организации вагонопотоков

предложено выполнять в денежном отношении на основе расходных ставок на вагоно- и паровозо-сутки. Пример выполнения оценки вариантов распределения сортировочной работы между станциями приведен в работе инж. В. С. Ларионова [32]. В соответствии с описанной в данной работе методикой выполнена оценка влияния организации вагонопотоков на простои вагонов под накоплением, объемы маневровой работы и сроки доставки. В целом в работах [32, 35, 70] задачу организации вагонопотоков решали путем оценки конкурирующих вариантов. При этом в условиях, когда выбор вариантов организации вагонопотоков для

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

сравнения выполняет человек, нет никакой гарантии того, что среди них будет оптимальный.

Первый метод для определения оптимального варианта специализации поездов, называемый методом последовательных аналитических сопоставлений (либо аналитических сопоставлений), предложил И. И. Васильев. В соответствии с [46], изначально задачу организации вагонопотоков И. И. Васильевым решал исключительно из условия соблюдения сроков доставки грузов без учета затрат вагоно-часов и маневровой работы. Результаты этих исследований были опубликованы во втором номере журнала «Техника и экономика путей сообщения» за 1924 год. Однако в дальнейшем в качестве критерия для оценки вариантов плана формирования поездов были выбраны приведенные вагоно-часы. Предлагаемая методика нахождения оптимального варианта специализации поездов, согласно [46], была опубликована в статьях «Специализация поездов» (журнал «Железнодорожное дело. Эксплуатация», 1926 г., № 10-11) и «К вопросу о специализации поездов» (журнал «Железнодорожное дело. Эксплуатация», 1927 г., № 7–8). Оценка эффективности вариантов плана формирования поездов в данном методе выполнена на основании сравнения вагоно-часов на станциях формирования с экономией от переработки на попутных технических станциях струй вагонопотоков. Для расчета использованы два основных условия: необходимое и достаточное. Недостатком этого метода являлось то, что он не гарантировал получения строго оптимального варианта плана формирования. Кроме того, результатом решения задачи был лишь один вариант организации вагонопотоков, хотя, как правило, задача имеет несколько решений с одинаковым или близким значением целевой функции, которые необходимо сравнивать по дополнительным параметрам. Несмотря на эти недостатки, разработанный профессором И. И. Васильевым метод аналитических сопоставлений послужил основой для создания и развития целого ряда различных методов расчета плана формирования, как и сформулированное им необходимое условие выделения струй вагонопотоков в отдельные назначения:

$$cm \leq n_i \sum t_{\text{эк}},$$

где n_i – мощность струи i -го назначения; $\sum t_{\text{эк}}$ – общие приведенные вагоно-часы экономии от проследования вагонопотока через все попутные технические станции направления.

Важным элементом разработанного И. И. Васильевым метода является использование достаточных условий выделения струй вагонопотоков в отдельные назначения, применить которые, согласно [46], в 1925 году предложил профессор П. Я. Гордеенко.

Другие методы выбора специализации поездов, разработанные до Второй мировой войны, описаны в учебниках В. А. Соковича [57] 1929 года, Н. Т. Кислякова и И. Г. Тихомирова [21] 1934 года, а также Д. П. Заглядинова и др. [18] 1941 года.

В 1944 году к. т. н. А. П. Петров (впоследствии профессор, член-корреспондент АН СССР) предложил принципиально новый метод расчета плана формирования поездов, который основывался на сравнении показателей всех возможных или определенным образом отобранных вариантов. Этот метод в дальнейшем получил название метода абсолютного расчета [46]. Начиная с 1944 года метод абсолютного расчета был принят в качестве основного, и в течение ряда лет его использовали для расчетов плана формирования. В 1949 году А. П. Петров был утвержден в ученой степени доктора технических наук. Докторской диссертацией стала работа на тему «План формирования поездов (опыт, теория, методика расчетов)». В 1950 году результаты этих исследований были изданы в виде монографии [46].

В основу метода абсолютного расчета А. П. Петрова положен полный перебор всех возможных вариантов плана формирования поездов. Такой подход обеспечивает получение точного оптимального решения, однако, учитывая огромное число возможных вариантов объединения струй вагонопотоков, ручную полную перебор выполняли не более чем для пяти станций на направлении. При большем числе станций расчеты было предложено выполнять в два этапа: на первом рассчитывали план формирования для основных опорных сортировочных станций, а на втором определяли наиболее выгодные его варианты распределения сортировочной работы между опорными

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

и неопорными станциями. Для формализации процесса расчета А. П. Петров разработал специальные таблицы. Решение задачи в два этапа позволяет сократить число анализируемых вариантов, однако получение оптимального решения в этом случае не гарантировано. Также необходимо отметить сделанный в [46] вывод об утрате актуальности проверки вариантов плана формирования поездов по условию обеспечения срока доставки грузов. После этого несколько десятилетий в работах по плану формирования поездов эту задачу не подымали.

По окончании Второй мировой войны было выполнено целый ряд исследований, направленных на совершенствование и разработку методов поиска оптимальных или близких к оптимальным решений на полигонах с большим числом расчетных станций. Все методы можно условно разделить на две группы. Первая группа методов реализована на основе эвристических алгоритмов решения задач оптимизации и является развитием подхода, предложенного проф. И. И. Васильевым. Они получили название аналитических методов. Эти методы основаны на практическом опыте и частных свойствах задачи организации вагонопотоков. Они не дают строго оптимального решения, но позволяют получать решения, близкие к оптимальным и достаточные для практических целей. Разработке и совершенствованию аналитических методов посвящены работы В. С. Ларионова [33], К. А. Бернгарда [4, 6], Л. П. Тулупова [63], С. Г. Стопичева [59], В. А. Покавкина [50], А. К. Угрюмова [64], В. М. Акулиничева [1].

Одним из наиболее широко применяемых эвристических методов является метод совмещенных аналитических сопоставлений, предложенный в 1948 г. К. А. Бернгардом [4]. Все расчеты в данном методе было выполнены при помощи специализированного графика возможных назначений, по которому осуществлялись последовательный отбор наиболее выгодных назначений поездов со всех возможных назначений сквозных поездов, которые проходят без переработки не менее одной технической станции. В дальнейшем метод неоднократно совершенствовали и дорабатывали [6]. Отбор наилучшего варианта плана формирования поездов производили по приведенным ваго-

но-часам сквозных назначений. В целом данный метод был пригоден к практической разработке планов формирования поездов, однако для него характерна значительная громоздкость. Кроме того, получаемые решения не являются строго оптимальными.

Вторую группу методов составили методы решения задачи организации вагонопотоков, основанные на математических методах оптимизации. Нужно отметить, что Вторая мировая война дала мощный толчок развитию математических методов исследования операций, и по ее окончании был сформирован математический аппарат, позволявший решать различные прикладные задачи оптимизации, в том числе и в области организации вагонопотоков. С разработкой таких методов связаны дальнейшие исследования А. П. Петрова [45], а также В. П. Черенина [73], А. И. Попова [52], В. Г. Саенко и Б. Дел Рио [55], С. В. Дуваляна [10–12].

Число возможных вариантов организации вагонопотоков является конечным. Именно на этом свойстве задачи и основан метод абсолютного расчета А. И. Петрова. Основная проблема при этом заключается в размерности задачи, и для ее преодоления во многих работах используют математические методы комбинаторики и дискретного программирования.

В 1948 году А. П. Петров и В. П. Черенин опубликовали работу [45], в которой предложили новый метод для расчетов оптимального плана формирования поездов, названный методом последовательных расчетов. Этот метод основан на свойстве супермодулярности целевой функции и позволяет отбрасывать заведомо бесперспективные множества допустимых решений. В дальнейшем метод последовательных расчетов развил профессор В. П. Черенин для решения разнообразных задач целочисленного программирования [23]. В данном случае на основе метода поиска оптимального плана формирования поездов был создан новый метод решения задач исследования операций.

В 1966 году А. И. Попов предложил методике и алгоритм расчета плана формирования одnogруппных поездов [52], основанную на положении теории множеств о том, что любое множество можно упорядочить по возрастанию или убыванию. Для представления множества вариантов плана формирования поездов ис-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

пользовали ориентированный параметрический граф, вершинами которого являлись элементы данного множества. Каждой вершине в соответствие поставлены затраты вагоно-часов на накопление, переработку и их сумма. При переходе от вершины к вершине по дуге графа корректировали затраты вагоно-часов: затраты на накопление увеличивали, а затраты на переработку уменьшали на величину экономии вагоно-часов на попутных станциях, зависящих от мощности рассматриваемого назначения. Построение графа выполняют по линиям, вдоль которых размещаются вершины с одинаковым числом сквозных назначений. Корнем графа является вершина, соответствующая участковой организации вагонопотоков, когда сквозные назначения отсутствуют. Поиск оптимального плана формирования поездов сводится к поиску на графе вершины с минимальными затратами приведенных вагоно-часов. Если при переходе от первоначального варианта к последующему происходит рост затрат приведенных вагоно-часов, то дальнейшую оценку вариантов этой ветви прекращают. Тем самым заведомо неконкурентные варианты отсеивали без их оценки. В [29] задача поиска оптимального плана формирования решена методом ветвей и границ, а в [19] – методом динамического программирования.

Использование математических методов теории графов, ветвей и границ, динамического программирования позволило сократить число рассматриваемых вариантов по сравнению с методом абсолютного расчета А. П. Петрова [46], однако объем вычислений оставался все равно большим даже для автоматизированного расчета.

В 1969 году С. В. Дувалян предложил решать задачу определения оптимального плана формирования одногруппных сквозных поездов как задачу целочисленного линейного программирования. Результаты этих работ представлены в [10]. Предложенный метод позволил в дальнейшем разработать алгоритм и применить его для расчета плана формирования одногруппных сквозных поездов [11, 12]. Использование методов линейного программирования позволяет находить оптимальные варианты плана формирования поездов за ограниченное число шагов с учетом разнообразных ограничений. Недостатком этого подхода явля-

ется то, что целевая функция задачи организации вагонопотоков нелинейно зависит от объемов переработки вагонов на станциях, поэтому получаемое после линеаризации оптимальное решение не всегда соответствует оптимальному решению исходной задачи.

Анализ публикаций по проблеме формирования методов решения задачи поиска оптимального плана формирования одногруппных сквозных поездов представлен в табл. 3.

Выполненный анализ показывает, что методы решения задачи поиска оптимального плана формирования одногруппных сквозных поездов были разработаны в СССР. Причем в СССР эту задачу преимущественно решалась в детерминированной и статической постановке как оптимизационную задачу с одним критерием оптимальности – минимумом приведенных вагоно-часов и различными ограничениями. Для решения задачи использовали эвристические методы оптимизации и методы дискретного программирования.

Использование электронных вычислительных машин для решения задачи поиска оптимального плана формирования поездов. Решение задачи поиска оптимального плана формирования поездов, как и других комбинаторных задач, сопряжено с необходимостью выполнения большого числа рутинных вычислительных операций, что связано со значительными затратами времени и риском ошибок. В этой связи при разработке методов поиска оптимального плана формирования поездов всегда большое внимание уделяли организации процесса вычислений. В качестве примеров можно привести графоаналитический метод В. С. Ларионова [33] или табличный метод Л. П. Тулупова [63]. Однако реальное решение проблемы необходимости выполнения большого числа рутинных вычислений было связано с развитием вычислительной техники. На начальном этапе были предприняты попытки разработки специализированных счетных машин, а также использования имеющихся счетных машин для решения задач плана формирования поездов [71, 72]. В 50-х годах XX века в СССР появились серийные электронные цифровые вычислительные машины первого поколения, и разработка планов формирования поездов стала одной из первых задач, которые решали с их помощью.

Таблица 3

Публикации, связанные с развитием решения задачи поиска оптимального плана формирования одногруппных сквозных поездов

Table 3

Publications related to the development of the solution to the problem of finding the optimal plan for the formation of single-group through trains

№ п/п	Год	Автор (ы)	Содержание	Примечания и ссылки
1	1921	Фролов А. Н.	Постановка задачи организации вагонопотоков. Решение задачи распределения сортировочной работы между двумя станциями	[70]
2	1924	Васильев И. И.	Впервые поставлена и решена задача построения плана формирования поездов по условию соблюдения сроков доставки	Согласно [46]
3	1926, 1927	Васильев И. И.	Сформулирована задача разработки плана формирования поездов по условию минимума затраты вагоно-часов, предложен первый метод поиска оптимального плана формирования поездов – метод аналитических сопоставлений	Согласно [46]
4	1929–1973	Сокович В. А., Кисляков Н. Т. и Тихомиров И. Г., Заглядимова Д. П. и др., Ларионов В. С., Саенко В. Г. и Б. Дел Рио, Бернгард К. А., Тулупов Л. П., Стопичев С. Г., Покавкин В. А., Угрюмов А. К., Акулиничев В. М.	Совершенствование аналитических и графоаналитических методов	[1, 6, 18, 21, 33, 50, 57, 59, 63, 64]
5	1944	Петров А. П.	Разработка абсолютного метода поиска оптимального плана формирования поездов – первого метода, позволяющего найти строго оптимальное решение	Согласно [46]
6	1948–1962	Черенин В. П.	Задача поиска оптимального плана формирования поездов формализована как задача целочисленного программирования. Предложен метод последовательных расчетов для решения задач целочисленного программирования	[45] (совместно с Петровым А. П.), [73]
7		Попов А. П.	Задача поиска оптимального плана формирования поездов формализована и решена как задача поиска на графе	[52]
8		Дувалян С. В.	Задача поиска оптимального плана формирования поездов формализована и решена как задача целочисленного линейного программирования	[10, 11, 12]

Продолжение табл. 3
Continuation of Table 3

№ п/п	Год	Автор (ы)	Содержание	Примечания и ссылки
9	1971	Казюлин Т. Е.	Задача поиска оптимального плана формирования поездов решена методом динамического программирования	[19]
10	1980	Кутыркин А. В., Васильев В. И.	Задача поиска оптимального плана формирования поездов решена методом ветвей и границ	[29]

В 1950-е годы А. П. Петров занялся транспортной кибернетикой. Он создал и возглавил отделение вычислительной техники Всесоюзного научно-исследовательского института железнодорожного транспорта (ВНИИЖТ), которое обеспечивало разработку и внедрение информационных технологий на железнодорожном транспорте. При этом организацию вагонопотоков А. П. Петров указал как первоочередную актуальную транспортную проблему, которая может быть решена на базе средств вычислительной техники [47]. Первая публикация о реализованной на ЭВМ программе, позволявшей определять оптимальный вариант плана формирования поездов, выполнена в 1958 году и принадлежит инж. Г. А. Кутуковой [28]. Программа была разработана в лаборатории вычислительной техники ВНИИЖТ для электронной вычислительной машины общего назначения первого поколения «Урал-1». Расчеты произведены по методике абсолютного расчета А. П. Петрова для линейного полигона с числом станций до 4. Продолжительность вычислений составляла порядка 3 с. В дальнейшем совершенствование методов поиска оптимального плана формирования поездов, с одной стороны и бурное развитие вычислительной техники и программного обеспечения – с другой стороны, позволило решать задачи организации вагонопотоков на все больших полигонах железных дорог. Анализ программных разработок по расчету плана формирования поездов, выполненных во времена СССР, приведен в табл. 4. В ней использованы данные из [44] с добавлением информации из [28]. В целом применение электронных вычислительных машин позволило в 1970-х годах получить решение задачи поиска оптимального плана формирования однопутных

сквозных поездов для железнодорожной сети СССР в детерминированной постановке.

Методы решения других задач организации вагонопотоков. Кроме задачи разработки плана формирования однопутных сквозных поездов, в СССР также был выполнен значительный объем исследований, направленных на решение других задач организации вагонопотоков.

Важной частью решения этой задачи на сети железных дорог является выбор рационального направления вагонопотоков на параллельных линиях. Решение данной задачи по критерию минимума эксплуатационных расходов привел А. П. Петров в [46], хотя в этой же работе указано, что существовали и более ранние способы выбора наиболее выгодного направления следования вагонопотоков в оперативных условиях, например метод В. Н. Белелюбского, предложенный в 1927 году. Такой же подход применен и в работе К. К. Тихонова [62].

Маршрутизация перевозок грузов позволяет сократить расходы за счет концентрации погрузки в определенные моменты времени.

Вопросы целесообразности формирования отправительских маршрутов различных категорий рассмотрены в работах Н. Т. Кислякова и И. Г. Тихомирова [21], В. Т. Осипова [43], М. Л. Забелло [50], В. Н. Орлова и В. В. Провороженко [42], А. П. Петрова [46], Н. М. Иванниченко [13], П. А. Коврова [22], Н. Е. Борового [7] и других авторов. Также проблеме организации вагонопотоков посвящены исследования по формированию групповых поездов [5, 49], организации порожних вагонопотоков [74, 34], организации вагонопотоков при выполнении местной работы на участках и железнодорожных узлах [40, 8].

Таблица 4

Развитие программного обеспечения по расчету плана формирования поездов во времена СССР

Table 4

Software development for calculating the plan of train formation during the USSR

Период разработки	Вид задачи	Метод	Автор методики	Число расчетных станций
1958	Расчет плана формирования одногруппных сквозных поездов	Абсолютных расчетов	А. П. Петров, Г. А. Кутукова	4
1959–1960	Расчет плана формирования одногруппных сквозных поездов	Последовательных расчетов	В. П. Черенин	6
			В. П. Черенин, В. Р. Хачатуров	9
1959–1961	Расчет плана формирования одногруппных сквозных поездов	Абсолютных расчетов	А. П. Петров	7
1959–1960	Расчет плана формирования одногруппных сквозных поездов	Совмещенных аналитических сопоставлений	К. А. Бернгард	24
1962	Расчет плана формирования одногруппных сквозных поездов	Приближенный аналитический метод	С. Г. Стопичев, Хуан Куан Да	24
1964–1967	Расчет плана формирования одногруппных сквозных поездов	Направленного перебора вариантов	А. И. Попов	24
	Расчет плана формирования одногруппных и групповых поездов			16
1967	Расчет плана формирования одногруппных сквозных поездов	Последовательного нахождения оптимального варианта	С. Г. Стопичев	24
1967	Расчет плана формирования одногруппных сквозных поездов	Совмещенных аналитических сопоставлений	Г. А. Кутукова	24
1969–1973	Расчет плана формирования одногруппных сквозных поездов	Целенаправленного отбора вариантов	В. А. Покавкин, Л. А. Кучай	48
1970–1993	Расчет плана формирования одногруппных сквозных поездов	Последовательного улучшения	С. В. Дувалян	285

Общим для предлагаемых в этих исследованиях методов является то, что их целью, как и при решении задачи поиска оптимального плана формирования одногруппных сквозных поездов, было снижение общих расходов на пере-

возку, выражаемое в натуральных или приведенных вагоно-часах или в денежном исчислении. Кроме того, в процессе поиска наилучшего порядка организации вагонопотоков в поезда эти задачи рассматривают как отдельные под-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

задачи, решаемые перед поиском оптимального плана формирования одногруппных сквозных поездов.

Перевозочный процесс на железнодорожном транспорте подвержен влиянию множества случайных факторов. Из-за этого мощности струй вагонопотоков в разные периоды времени могут существенно отличаться и, по сути, являются случайными величинами. В работе [46] были поставлены задачи руководства выполнением плана формирования поездов и оперативной корректировкой плана формирования поездов, однако принципы решения данных задач не приведены. С началом использования ЭВМ появилась техническая база, которая дала возможность в режиме реального времени следить за вагонопотоками на сети и выполнять их статистическую обработку, что позволяет осуществлять корректировку плана формирования поездов в зависимости от изменения мощности назначений. На решение задач оперативной корректировки плана формирования поездов направлены работы А. В. Кутыркина [30, 31], В. А. Покавкина [51], Л. Д. Окипного [41] и других авторов.

Практическая реализация методов организации вагонопотоков в поезда на железнодорожном транспорте. К концу XIX века организацию железнодорожных перевозок на каждой дороге осуществляли в соответствии с разрабатываемыми внутри дороги рекомендациями. В 1893 году на Юго-Западных железных дорогах были введены «Правила составления товарных поездов по пунктам назначения», в которых, в том числе, были изложены и принципы специализации поездов, а также принципы формирования групповых поездов.

Рост объемов перевозок в условиях индустриализации СССР, а также централизация управления железнодорожным транспортом создали потребность и условия для совершенствования системы организации вагонопотоков. В соответствии с [46], в 1921 году приказом ГУПС № 3548 было предложено приступить к составлению плана сортировочной работы, взаимно согласовывая планы сортировочной работы по отдельным станциям дорог района и между районами. В результате в 1922 году

должны были создать «общий план сортировочной работы сети дорог Республики на всех направлениях». Однако эта попытка не увенчалась успехом.

Формирование грузовых поездов на железных дорогах СССР 20-х – начала 30-х годов XX века осуществляли на основании «Схем специализации», которые, в свою очередь, составляли на основании «Наставлений о специализации товарных поездов», таких как [37], а позже, согласно с [21, 36], на основании «Наставления по специализации и маршрутизации поездов» (брошюра НКПС № Э271, 1930 г.). Согласно [21], специализацию поездов, следующих между разными дорогами, устанавливали дороги или соседние районы при заключении узловых соглашений, а после 1933 года – на маршрутных съездах. Специализацию поездов, следующих внутри дорог, назначили сами дороги. На основании принятой специализации поездов для станций разрабатывали схемы специализации, в которых указывали: суточное число вагонов, при котором формируют поезд, допустимое время задержки вагонов под накоплением, назначения вагонов для пополнения состава поезда, порядок формирования групп в нем.

С 1929 года в СССР начались экономические реформы, связанные с переходом на модель плановой экономики, что незамедлительно отразилось и на работе железнодорожного транспорта. Состоявшийся в 1931 году июньский Пленум ЦК ВКП(б), на котором обсуждали пути улучшения работы транспорта, указал на необходимость реформ на железнодорожном транспорте. Основной из них стала замена схем специализации поездов единым для сети железных дорог планом формирования, обеспечивающим рациональную организацию вагонопотоков. Указанные реформы были проведены в 1935–1937 годах, после чего план формирования поездов наряду с графиком движения стал одним из основных документов, определяющих организацию эксплуатационной работы железных дорог. Системное изменение подходов к организации вагонопотоков, произошедшее в СССР во второй половине 30-х годов, прослеживается и в учебной литературе по организации перевозок на железнодорожном транспорте. Так, в учебнике 1934 года

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Н. Т. Кислякова и И. Г. Тихомирова [21] принципы организации вагонопотоков описаны в главе 11 «Специализация грузовых поездов» с отдельным пунктом «Схемы специализации грузовых поездов», в то время как в учебнике 1941 года В. А. Соковича и др. [58] принципы организации вагонопотоков уже изложены в разделе VIII «Основы формирования поездов», подразделы 3–7 которого посвящены вопросам разработки оптимального плана формирования поездов.

В годы Второй мировой войны железнодорожные перевозки осуществляли исходя из потребностей фронта. В системе организации вагонопотоков преобладали маршрутные поезда с тыла на фронт. Кроме перевозок грузов для нужд фронта, существовала острая необходимость перемещения груженых вагонопотоков между оборонными предприятиями, находящимися внутри страны. В общем перевозки этих грузов имели большие объемы, однако по своей структуре были раздроблены и поэтому не охватывались отправительской маршрутизацией. В этой связи возникло разделение плана формирования на две части. Первую часть составили маршрутные перевозки с мест погрузки. Ко второй части была отнесена организация менее мощных назначений вагонопотоков в сквозные поезда. Такая структура плана формирования поездов сохраняется и до наших дней.

Накопленный опыт и результаты научных исследований по организации вагонопотоков на сети железных дорог СССР позволили в 1952 году издать «Инструктивные указания по составлению плана формирования поездов» [14], составленные профессорами А. П. Петровым, К. А. Бернгардом, М. Л. Забелло и М. А. Симаковским под общим руководством А. П. Петрова. Структура этих Инструктивных указаний преимущественно повторяла структуру основной части монографии А. П. Петрова [46] и включала 20 глав, соответствующих отдельным этапам разработки плана формирования поездов. В 1967 году на замену [14] были введены «Инструктивные указания по организации вагонопотоков на железных дорогах СССР» [15]. Третий раз пересмотр Инструктивных указаний был выполнен

в 1984 году [16]. В его процессе были учтены новые, более совершенные методы сбора исходных данных для разработки плана формирования поездов, оценки эффективности отдельных его вариантов и поиска наилучшего варианта организации вагонопотоков.

Построенная в СССР система организации вагонопотоков в поезда являлась одним из основных факторов, значительно обеспечивающих более высокие показатели использования железнодорожной инфраструктуры и подвижного состава по сравнению с другими государствами. Так, в СССР по сравнению с США в 1990 году грузонапряженность железных дорог была выше в 3 раза, производительность вагона выше в 2,75 раза, а оборот вагонов при близкой дальности перевозок был ниже в 3,4 раза [27]. С другой стороны, ориентация железных дорог СССР на уменьшение средней себестоимости перевозок привела к снижению показателей качества оказываемых услуг, таких как скорость и точность выполнения сроков доставки грузов.

План формирования поездов на железных дорогах Украины. После обретения Украиной независимости и формирования ее собственной железнодорожной транспортной системы в 2004 году на «Укрзалізниця» приняты Инструктивные указания по организации вагонопотоков на железных дорогах Украины [17]. В этом документе были учтены появление действующего на территории бывшего СССР межгосударственного плана формирования поездов, изменения организационной структуры «Укрзалізниця», изменения автоматизированной системы управления перевозками. В то же время как цели организации вагонопотоков в поезда, так и методы решения задачи остались те же, что и во времена СССР. Поэтому в настоящее время в Украине фактически действует порядок организации вагонопотоков в поезда, созданный для условий работы железнодорожного транспорта Советского Союза.

Сейчас в Украине так же, как и в СССР, перевозки осуществляют один перевозчик (АО «Укрзалізниця»), а дифференциация железнодорожного тарифа в зависимости от срока доставки и маршрута перевозки отсутствует. Однако по сравнению с условиями работы желез-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

ных дорог СССР произошли и существенные изменения, среди которых прежде всего необходимо выделить следующие:

– значительную часть перевозок выполняют в собственных вагонах, в уменьшении оборота которых перевозчик (АО «Укрзалізниця») не имеет прямой заинтересованности, особенно в условиях произошедшего уменьшения нормативных сроков доставки грузов (для повагонных отправок с 330 до 200 км/сут и маршрутных отправок с 550 до 320 км/сут.);

– мощности вагонопотоков в целом упали из-за снижения объемов перевозок грузов, в то же время число назначений струй вагонопотоков возросло из-за необходимости подборки вагонов по собственникам и техническому состоянию;

– на отдельных направлениях, прежде всего в морские порты, пропускная способность железных дорог полностью исчерпана, и существует необходимость перераспределения вагонопотоков на параллельные направления;

– парк поездных и маневровых локомотивов существенно изношен, и имеет место дефицит тяговых средств для выполнения перевозок, особенно тепловозов;

– между железнодорожным и автомобильным транспортом существует жесткая конкуренция за грузопотоки из-за перехода к рыночной экономике, а также из-за сокращения среднего расстояния перевозок железнодорожным транспортом ввиду сокращения площади страны более чем в 37 раз;

– на железнодорожном транспорте внедрены автоматизированные системы управления, позволяющие контролировать состояние перевозочного процесса в реальном режиме времени.

В этих условиях в Украине произошел значительный уклон в сторону решения задач оперативного управления поездобразованием в ущерб стабильности плана формирования поездов. Показательной является ситуация на Одесском железнодорожном узле, где фактическое число назначений формируемых поездов стабильно превышает число назначений, указанных в плане формирования. Этот факт даже отражен в технологических процессах работы станций Одесса–Порт, Одесса Сортировочная и

Одесса–Застава–1. Комплексный расчет плана формирования поездов в Украине практически не выполняют. Вместо этого ежегодно осуществляют только корректировку предшествующего плана формирования. Действующий план формирования поездов АО «Укрзалізниця» имеет значительные возможности для его оперативной корректировки, что связано с нестабильностью вагонопотоков. Однако такое решение в настоящее время принимает человек, что не позволяет учесть все факторы и исключить субъективизм в оценках вариантов. Меньшие размеры сети Украины по сравнению с железнодорожной сетью СССР, более совершенная система автоматизированного управления АСК ВП УЗ-Е по сравнению с советской АСОУП, внедрение автоматизированной системы планирования перевозок грузов «АС МЕСПЛАН» создают возможность комплексного решения задачи организации и продвижения вагонопотоков в реальном времени в зависимости от сложившейся оперативной ситуации.

Дальнейшее реформирование рынка железнодорожных перевозок в Украине направлено на достижение соответствия нормам европейского законодательства в области железнодорожного транспорта. Основные изменения при этом будут связаны с допуском к магистральной железнодорожной инфраструктуре независимых перевозчиков и разделением услуг железнодорожной инфраструктуры. Услуги по формированию поездов в соответствии с положениями Директив 2001/14ЕС и 2012/34 ЕС в проекте Закона Украины «О железнодорожном транспорте» выделены в отдельный вид услуг и отнесены к дополнительным услугам железнодорожной инфраструктуры. Их может предоставлять перевозчику как оператор инфраструктуры общего пользования, так и другие субъекты хозяйствования – собственники железнодорожной инфраструктуры (операторы объектов обслуживания в терминах Директивы 2012/34 ЕС). В этой связи при организации вагонопотоков в поезда у оператора инфраструктуры общего пользования и операторов объектов обслуживания будут возникать задачи распределения мощности железнодорожной инфраструктуры по формированию поездов

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

между различными перевозчиками и установления стоимости этих услуг с целью получения максимальной прибыли. Кроме того, у каждого отдельного перевозчика будет возникать собственная задача организации своих поездопотоков на инфраструктуре общего и необщего пользования с целью выполнения запланированных объемов перевозок и достижения максимальной прибыли.

Научная новизна и практическая значимость

В работе впервые на основании исторического анализа развития методов организации вагонопотоков на железных дорогах Российской империи и СССР установлены связи между условиями работы железнодорожного транспорта и методами организации вагонопотоков в поезда.

Ценность результатов для практики состоит в том, что они указывают на необходимость изменения в Украине системы организации вагонопотоков в соответствии с условиями работы ее железнодорожного транспорта и выбранным направлением реформирования рынка железнодорожных перевозок.

Выводы

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы. Методы организации вагонопотоков прошли значительный путь развития под влиянием изменений условий работы

железнодорожного транспорта, развития технических средств управления им и математических методов оптимизации. Возникновение научных методов организации вагонопотоков в поезда относится ко временам Российской империи. Современный подход к организации вагонопотоков, базирующийся на плане формирования поездов, был разработан в 1931–1945 гг. Целью внедрения плана формирования поездов было снижение расходов железных дорог на выполнение перевозок грузов. Условиями реализации такого подхода является то, что железные дороги вертикально интегрированы: они одновременно и эксплуатируют инфраструктуру, и являются перевозчиком, выполняющим перевозки грузов в своих вагонах, при этом конкуренция между видами транспорта за грузопотоки отсутствует.

Современные методы решения задачи организации вагонопотоков в основном формировались в 1945–1952 годах. В их основу положено разделение задачи организации вагонопотоков в поезда на отдельные подзадачи и последовательное их решение в детерминированной и статической постановке. Практически задача организации вагонопотоков на железных дорогах СССР была решена в 1970–1980-х гг. с помощью ЭВМ. Переход Украины к рыночной модели экономики привел к существенному изменению условий работы железнодорожного транспорта, что требует пересмотра принципов организации вагонопотоков в поезда.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Акулиничев В. М. Новый метод расчета плана формирования поездов. *Труды МИИТа*. 1959. Вып. 113. С. 76–102.
2. Аргинский К. Хлебные залежи на русских железных дорогах. *Вестник Саратовского отделения РТО*. 1903. № 1; 3; 4. С. 12; 25; 38.
3. Бернгард К. А. Мероприятия по сокращению простоя вагонов под накоплением одногруппных технических маршрутов. *Труды ВНИИЖТа*. 1946. Вып. 1. С. 4–33.
4. Бернгард К. А., Забелло М. Л., Шулько В. П. Расчет плана формирования одногруппных технических маршрутов. *Труды ВНИИЖТа*. 1948. Вып. 17. 44 с.
5. Бернгард К. А. Групповые поезда (Вопросы организации вагонопотоков). *Труды ВНИИЖТа*. 1953. Вып. 76. 168 с.
6. Бернгард К. А. *Техническая маршрутизация железнодорожных перевозок*. Москва : Трансжелдориздат, 1956. 237 с.
7. Боровой Н. Е. *Маршрутизация перевозок грузов*. Москва : Транспорт, 1978. 216 с.
8. Буянова В. К., Балашова Т. В., Тимохин Э. Ю. Внутридорожный план формирования поездов : методика расчета, алгоритмы. *Труды ЦНИИ МПС*. 1978. Вып. 589. 135 с.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

9. Васильев И. И. *Графики и расчеты по организации железнодорожных перевозок*. Москва : Трансжелдориздат, 1941. 575 с.
10. Дувалян С. В. Методы и алгоритмы решения задач планирования и учета на железнодорожном транспорте. *Сборник научных трудов ВНИИЖТа*. 1969. № 401. 256 с.
11. Дувалян С. В. *Разработка алгоритмов и программ расчета сетевого плана формирования поездов : отчет по научно-исследовательской работе*. Москва : ВНИИЦ, 1978. 120 с.
12. Дувалян С. В., Гарслян А. Е. Расчет плана формирования одногруппных поездов при переменных нормативах и ограничениях размеров переработки вагонов на станциях. *Вестник ВНИИЖТа*. 1988. № 6. С. 1–5.
13. Заглядимов Д. П., Петров А. П., Сергеев Е. С. Организация движения на железнодорожном транспорте. Москва : Трансжелдориздат, 1941. 560 с.
14. Иваницкий Н. М. Эффективное использование отправительской маршрутизации. *Железнодорожный транспорт*. 1956. № 5. С. 74–75.
15. Инструктивные указания по составлению плана формирования поездов / МПС СССР. [Действующий от 1951-12-03]. Москва : Трансжелдориздат, 1952. 152 с.
16. Инструктивные указания по организации вагонопотоков на железных дорогах СССР. [Действующий от 1966-09-24]. Москва : Транспорт, 1967. 190 с.
17. Инструктивные указания по организации вагонопотоков на железных дорогах СССР. [Действующий от 1982-04-19]. Москва : Транспорт, 1984. 256 с.
18. Інструктивні вказівки з організації вагонопотоків на залізницях України. [Чинний від: 2004-12-29]. Затв. наказом Укрзалізниці від № 1028–ЦЗ. Київ : ТОВ «Швидкий рух», 2005. 100 с.
19. Казюлин Т. Е. Выбор оптимального варианта организации вагонопотоков методом динамического программирования. *Труды МИИТ*. 1971. Вып. 362. С. 18–35.
20. Карамышев Д. М. О работе сортировочного парка. *Известия общего бюро совещательных съездов*. 1910. № 1; 2. С. 45; 129.
21. Кисляков Н. Т., Тихомиров И. Г. *Организация железнодорожных перевозок*. Москва : Трансжелдориздат, 1934. 288 с.
22. Ковров П. А. К расчету эффективности отправительской маршрутизации. *Вопросы эксплуатации железных дорог*. 1961. Вып. 182. С. 106–127.
23. Корбут А. А., Финкельштейн Ю. Ю. *Дискретное программирование*. Москва : Наука, 1969. 368 с.
24. Кочнев Ф. П. Максимович Б. М. Померанцев В. В. Тихонов К. К. Черномордик Г. И. *Организация движения на железнодорожном транспорте : учеб. для вузов ж.-д. трансп.* Москва : Трансжелдориздат, 1958. 491 с.
25. Кочнев Ф. П., Тихонов К. К., Черномордик Г. И. *Организация движения на железнодорожном транспорте : учеб. для вузов*. Москва : Трансжелдориздат, 1963. 520 с.
26. Краузе А. О мерах к ускорению доставки грузов по железным дорогам. *Инженер*. 1894. № 4. С. 172–176.
27. Курбатова А. В., Курбатов Ф. С. Железнодорожный транспорт России и США в показателях использования путевой инфраструктуры, подвижного состава и производительности труда. *Россия и мир*. 2012. Вып. 4. С. 118–130.
28. Кутукова Г. А. Расчет показателей заданного варианта плана формирования на ЭЦВМ. *Вестник ВНИИЖТа*. 1958. № 1. С. 60–62.
29. Кутыркин А. В., Васильев В. И. Расчет оптимального плана формирования одногруппных поездов методом ветвей и границ. *Вестник ВНИИЖТа*. 1980. № 7. С. 49–54.
30. Кутыркин А. В. Динамическая модель планирования и оперативного управления вагонопотоками. *Вестник ВНИИЖТа*. 1981. № 8. С. 7–13.
31. Кутыркин А. В. Алгоритмы оперативной корректировки плана формирования поездов. *Вестник ВНИИЖТа*. 1983. № 8. С. 1–6.
32. Ларионов В. С. К вопросу о специализации товарных поездов. *Труды МИИТа*. 1927. Вып. V. С. 251; 288.
33. Ларионов В. С. Новый метод расчета плана формирования. *Железнодорожный транспорт*. 1947. № 10. С. 12–15.
34. Левин Д. Ю. Организация порожних вагонопотоков со станцией выгрузки. *Вестник ВНИИЖТа*. 1977. № 7. С. 46–48.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

35. Манос И. Я., Фролов А. Н. *Общий курс эксплуатации железных дорог*. Москва, Ленинград : Гос. изд-во, 1926. 208 с.
36. Михельсон К. П. Лженаука в эксплуатации железных дорог под прикрытием «математики». *Труды МИИТа*. 1937. Вып 50. С. 51–82.
37. *Наставление о специализации товарных поездов*. Москва : Московско-Казанская ж. д., 1925. 25 с.
38. Негрей В. Я., Шкурин К. М. Синергетический подход к расчету плана формирования одногруппных поездов. *Наука та прогрес транспорту*. 2018. № 5 (77). С. 53–64.
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/147718>
39. Нейштадт С. И. Транспорт, работающий на пределе. *Эксплуатация железных дорог*. 1934. № 6. С. 14–17.
40. Нурмухамедов Р. З. Исследование вопросов расчета плана формирования поездов в районе местной работы. *Труды ТашИИТ*. 1982. Вып. 176 / 23. С. 69–81.
41. Окипный Л. Д., Покавкин В. А. Эффективность оперативной организации вагонопотоков. *Железнодорожный транспорт*. 1985. № 11. С. 13–16.
42. Орлов В. Н., Повороженко В. В. *Технико-экономические расчеты по организации железнодорожных перевозок*. Москва : Трансжелдориздат, 1943. 281 с.
43. Осипов, В. Т. *Отправительская маршрутизация на железнодорожном транспорте*. Москва : Трансжелдориздат, 1958. 486 с.
44. Осьминин А. Т. Развитие теории и методов расчета плана формирования поездов. *Железнодорожный транспорт*. 2010. № 10. С. 31–39.
45. Петров А. П., Черенин В. П. Усовершенствование метода составления плана формирования поездов. *Железнодорожный транспорт*. 1948. № 3. С. 60–71.
46. Петров А. П. *План формирования поездов : Опыт, теория, методика расчетов*. Москва : Трансжелдориздат, 1950. 483 с.
47. Петров А. П. Применение электронных вычислительных машин на железнодорожном транспорте. *Вестник ВНИИЖТа*. 1958. № 1. С. 8–18.
48. Повороженко В. П., Бернгард К. А., Гликман М. С. Эксплуатационные требования к размещению сортировочных станций. *Труды ВНИИЖТа*. 1948. Вып. 25. 289 с.
49. Покавкин В. А. К вопросу об эффективности групповой технической маршрутизации перевозок. *Сборник научных трудов РИИЖТ*. 1961. Вып. 30. С. 93–143.
50. Покавкин В. А. Расчет плана формирования одногруппных поездов модифицированным методом последовательного приближения. *Труды РИИЖТа*. 1973. Вып. 98. С. 25–68
51. Покавкин В. А., Мелешко В. Н. Оперативное назначение групповых поездов и использование дифференцированных масс поездов в системе оптимальной организации вагонопотоков. *Вопросы увеличения пропускной и провозной способности железных*. 1985. Вып. 182. С. 51–57.
52. Попов А. И. Алгоритм и программа расчета плана формирования одногруппных и групповых поездов на ЭВМ по методу направленного перебора вариантов. *Труды МИИТа*. 1966. Вып. 229. 68 с.
53. Прохорченко А. В. Исследование свойства масштабной инвариантности системы организации поездопотоков на основе теории перколяции. *Наука и прогресс транспорта*. 2014. № 5 (53). С. 56–64.
DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2014/30471>
54. Рихтер И. И. *Очерк мер, уменьшающих расходы содержания и эксплуатации железных дорог*. Санкт-Петербург, 1883. 60 с.
55. Саенко В. Г., Дел Рио Б. Выбор оптимального варианта плана формирования одногруппных поездов. *Железнодорожный транспорт*. 1953. Вып 9. С. 78–85.
56. Сокович В. А. Влияние простоя вагонов на сортировочных станциях в зависимости от числа сортируемых направлений. *Вестник Екатеринбургской ж.-д.* 1916. № 462 / 30. С. 1–5.
57. Сокович В. А. *Железнодорожные перевозки : Основы организации*. Москва : Транспечать НКПС, 1929. 315 с.
58. Сокович В. А., Пошивайло И. Н., Гранквист В. В., Колесников Н. П. *Организация движения на железнодорожном транспорте* : учеб. для вузов ж.-д. трансп. : в 2 т. Москва : Трансжелдориздат, 1941. Т. 1; Т. 2. 496 с.; 374 с.
59. Стопичев С. Г. Нахождение оптимального варианта плана формирования одногруппных технических маршрутов. *Вестник ВНИИЖТ*. 1959. № 4. С. 19–23.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

60. Стрелко О. Г. Аналіз наукового доробку професора О. М. Фролова (1863-1939) в галузі експлуатації залізниць. *Наукові праці істор. фак-ту Запорізького нац. ун-ту*. 2015. Вип. 4. С. 361–364.
61. *Технический справочник железнодорожника. Т. 13 : Эксплуатация железных дорог* / ред. Р. И. Робель. Москва : Трансжелдориздат, 1956. 740 с.
62. Тихонов К. К. *Технико-экономические расчеты в эксплуатации железных дорог*. Москва : Всесоюз. издательско-полиграфическое объединение Министерства путей сообщения, 1962. С. 252.
63. Тулупов Л. П. Расчет плана формирования поездов с помощью вспомогательных таблиц. *Труды МИИТа*. 1953. Вып. 79. С. 150–165.
64. Угрюмов А. К. Совершенствование методов расчета плана формирования. *Железнодорожный транспорт*. 1953. № 6. С. 58–66.
65. Фролов А. Н. Общие мысли о простое вагонов на сортировочных станциях. *Инженер*. 1901. № 5. С. 235–238.
66. Фролов А. Н. Новая идея хлебной мобилизации. *Вестник Саратовского отделения РТО*. 1903. № 3. С. 41.
67. Фролов А. Н. Общие соображения о простое вагонов на сортировочных станциях. *XX Совецательный съезд инженеров службы пути русских железных дорог 1902 г. Протоколы заседаний и труды*. 1903. С. 157–165.
68. Фролов А. Н. *Общие соображения о простое вагонов в сортировочной станции*. Саратов, 1903. 16 с.
69. Фролов А. Н. *Сборник статей, касающихся станций и маневров*. Саратов, 1906. 143 с.
70. Фролов А. Н. К вопросу о взаимодействии сортировочных станций. *Техника и экономика путей сообщения*. 1921. № 8. С. 19–24.
71. Черенин В. П. *Счетная машина для составления плана формирования поездов : Изобретение № 405197-1У. I.X*. 1949. Авторское свидетельство от 24.01.1951.
72. Черенин В. П. Механизация расчетов по составлению плана формирования поездов. *Техника железных дорог*. 1954. № 1. С. 22–24.
73. Черенин В. П. Алгоритм и программа последовательных расчетов плана формирования. Составление плана формирования поездов на электронных машинах. *Труды ВНИИЖТа*. 1962. Вып. 247. С. 113–131.
74. Чернов Г. И. Оптимальное распределение порожних цистерн на полигоне дороги. *Железнодорожный транспорт*. 1978. № 1. С. 10–14.

Д. М. КОЗАЧЕНКО^{1*}, О. Ю. ПАПАХОВ^{2*}, Ю. М. ГЕРМАНИЮК^{3*}

^{1*}Каф. «Управління експлуатаційною роботою», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта kozachenko@upr.dit.edu.ua, ORCID 0000-0003-2611-1350

^{2*}Каф. «Управління експлуатаційною роботою», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта rarahova0362@gmail.com, ORCID 0000-0003-2357-8158

^{3*}Каф. «Транспортні технології», Львівська філія Дніпровського національного університету залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. І. Блажкевич, 12а, Львів, Україна, 79000, тел. +30 (032) 267 99 74, ел. пошта yuhermanyuk@gmail.com, ORCID 0000-0002-4905-8313

РОЗВИТОК МЕТОДІВ ОРГАНІЗАЦІЇ ВАГОНОПОТОКІВ У РОСІЙСЬКІЙ ІМПЕРІЇ ТА СРСР

Мета. Основною метою цієї статті є дослідження розвитку методів організації вагонопотоків у поїзди на залізницях Російської імперії та СРСР. **Методика.** Дослідження виконані на основі аналізу літературних джерел і методів теорії організації експлуатаційної роботи залізниць. **Результати.** Методи організації вагонопотоків пройшли значний шлях розвитку під впливом змін умов роботи залізничного транспорту, формування технічних засобів управління ним і математичних методів оптимізації. Виникнення наукових методів організації вагонопотоків у поїзди сягає часів Російської імперії. Сучасний підхід до організації вагонопотоків, що базується на плані формування поїздів, розвивався в СРСР в 1931–1945 рр. Метою впровадження плану формування поїздів було зниження витрат залізниць на виконання перевезень вантажів. Умовами реалізації такого підходу є те, що залізниці вертикально інтегровані: вони одночасно експлуатують залізничну інфраструктуру

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

і є перевізником, який виконує перевезення вантажів у власних вагонах, при цьому конкуренція між видами транспорту за вантажопотоки відсутня. Формування сучасних методів розв'язання задачі організації вагонопотоків здебільшого відбулося в 1945–1952 роках. В основу цих методів покладено розбиття задачі організації вагонопотоків у поїзди на окремі підзадачі й послідовне їх розв'язання в детермінованій і статичній постановці. Практично задача організації вагонопотоків на залізницях СРСР у сучасній її постановці була розв'язана в 1970–1980-х рр. за допомогою ЕОМ. Перехід України до ринкової моделі економіки призвів до істотної зміни умов роботи залізничного транспорту, що вимагає перегляду принципів організації вагонопотоків у поїзди. **Наукова новизна.** У роботі вперше на підставі історичного аналізу розвитку методів організації вагонопотоків на залізницях Російської імперії і СРСР встановлено зв'язки між умовами роботи залізничного транспорту й методами організації вагонопотоків у поїзди. **Практична значимість.** Цінність результатів для практики полягає в тому, що вони вказують на необхідність зміни в Україні системи організації вагонопотоків відповідно до умов роботи її залізничного транспорту й обраного напрямку реформування ринку залізничних перевезень.

Ключові слова: залізничний транспорт; організація вагонопотоків; план формування поїздів; накопичення вагонів

D. M. KOZACHENKO^{1*}, O. Y. PAPAHOV^{2*}, Y. N. HERMANIUK^{3*}

^{1*}Dep. «Operational Work Management», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail kozachenko@upp.diit.edu.ua, ORCID 0000-0003-2611-1350

^{2*}Dep. «Operational Work Management», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 04, e-mail papahova0362@gmail.com, ORCID 0000-0003-2357-8158

^{3*}Dep. «Transport Technologies», Dnipro National University of Railway Transport named after academician V. Lazaryan, Lviv branch, I. Blazhkevycha St., 12a, Ukraine, 79000, tel. +30 (032) 267 99 74, e-mail yuhermanyuk@gmail.com, ORCID 0000-0002-4905-8313

DEVELOPMENT OF CAR TRAFFIC VOLUMES ORGANIZATION METHODS IN THE RUSSIAN EMPIRE AND IN THE USSR

Purpose. The main purpose of this article is to study the development of methods for organizing car traffic volumes into trains at the railways of the Russian Empire and the USSR. **Methodology.** The studies were carried out based on an analysis of literary sources and methods of the theory of organization of operational work of railways. **Findings.** The methods for organizing car traffic volumes have gone a significant development path under the influence of changes in the working conditions of railway transport, the formation of control technology and mathematical methods of optimization. The emergence of scientific methods for organizing car traffic volumes in trains dates back to the times of the Russian Empire. A modern approach to the organization of car traffic volumes is based on the plan for the train formation, developed in the USSR in 1931–1945. The goal of the implementation of the train formation plan was to reduce railroad expenses for cargo transportations. The conditions for the implementation of this approach is that the railways are vertically integrated: they simultaneously operate the railway infrastructure, and are the carriers transporting goods in their cars, while there is no competition between the transport modes for freight traffic volumes. The formation of modern methods for solving the problem of organizing car traffic volumes was mainly performed in 1945–1952. The basis of these methods is the separation of the organization of car traffic volumes into separate subtasks and their sequential solution in a deterministic and static setting. In practice, the organization of car traffic volumes at the railways of the USSR was solved in the 1970–1980s using a computer. The transition of Ukraine to a market model of the economy has led to a significant change in the working conditions of railway transport, which requires a review of the principles of organizing car traffic volumes into trains. **Originality.** For the first time, based on a historical analysis of the development of methods for organizing car traffic volumes at the railways of the Russian Empire and the USSR, connections were established between the working conditions of railway transport and methods for organizing car traffic volumes into trains. **Practical value** lies in the fact that they indicate the need to change in Ukraine the organization of car traffic volumes in accordance with the current working conditions of railway transport and the chosen direction of reforming the railway transportation market.

Ключевые слова: railway transport; car traffic volumes organization; train formation plan; cars accumulation

REFERENCES

1. Akulinichev, V. M. (1959). Novyy metod rascheta plana formirovaniya poezdov. *Trudy MIITa*, 113, 76-102. (in Russian)
2. Arginskiy, K. (1903). Khlebnye zalezhi na russkikh zheleznykh dorogakh. *Vestnik Saratovskogo otdeleniya RTO*, 1; 3; 4, 12; 25; 38. (in Russian)
3. Berggard, K. A. (1946). Meropriyatiya po sokrashcheniyu prostoya vagonov pod nakopleniem odnogruppykh tekhnicheskikh marshrutov. *Trudy VNIIZhTa*, 1, 4-33. (in Russian)
4. Berggard, K. A., Zabello, M. L., & Shulko, V. P. (1948). Rasschet plana formirovaniya odnogruppykh tekhnicheskikh marshrutov. *Trudy VNIIZhTa*, 17, 44. (in Russian)
5. Berggard, K. A. (1953). Gruppovye poezda (Voprosy organizatsii vagonopotokov). *Trudy VNIIZhTa*, 76, 168. (in Russian)
6. Berggard, K. A. (1956). *Tekhnicheskaya marshrutizatsiya zheleznodorozhnykh perezovok*. Moscow: Transzheldorizdat. (in Russian)
7. Borovoy, N. Ye. (1978). *Marshrutizatsiya perezovok gruzov*. Moscow: Transport. (in Russian)
8. Buyanova, V. K., Balashova, T. V., & Timokhin, E. Yu. (1978). Vnutridorozhnyy plan formirovaniya poezdov: metodika rascheta, algoritmy. *Trudy TsNII MPS*, 589, 135. (in Russian)
9. Vasilev, I. I. (1941). *Grafiki i raschety po organizatsii zheleznodorozhnykh perezovok*. Moscow: Transzheldorizdat. (in Russian)
10. Duvalyan, S. V. (1969). Metody i algoritmy resheniya zadach planirovaniya i ucheta na zheleznodorozhnom transporte. *Sbornik nauchnykh trudov VNIIZhTa*, 401, 256. (in Russian)
11. Duvalyan, S. V. (1978). *Razrabotka algoritmov i programm rascheta setevogo plana formirovaniya poezdov: otchet po nauchno-issledovatel'skoy rabote*. Moscow: VNGITs. (in Russian)
12. Duvalyan, C. B., & Garslyan, A. Ye. (1988). Raschet plana formirovaniya odnogruppykh poezdov pri peremennykh normativakh i ogranicheniyakh razmerov pererabotki vagonov na stantsiyakh. *Vestnik VNIIZhTa*, 6, 1–5. (in Russian)
13. Zaglyadimov, D. P., Petrov, A. P., & Sergeev, Ye. S. (1941). *Organizatsiya dvizheniya na zheleznodorozhnom transporte*. Moscow: Transzheldorizdat. (in Russian)
14. Ivanitskiy, N. M. (1956). Effektivnoe ispolzovanie otpravitelskoy marshrutizatsii. *Zheleznodorozhnyy transport*, 5, 74-75. (in Russian)
15. *Instruktivnye ukazaniya po sostavleniyu plana formirovaniya poezdov/MPS SSSR*. (1952). Moscow: Transzheldorizdat. (in Russian)
16. *Instruktivnye ukazaniya po organizatsii vagonopotokov na zheleznykh dorogakh SSSR*. (1967). Moscow: Transport. (in Russian)
17. *Instruktivnye ukazaniya po organizatsii vagonopotokov na zheleznykh dorogakh SSSR*. (1982). Moscow: Transport. (in Russian)
18. *Instruktyvni vkazivky z orhanizatsii vahonopotokiv na zaliznytsiakh Ukrainy: No. 1028-TsZ*. (2015). Kyiv: TOV «Shvydkyi rukh. (in Ukrainian)
19. Kazyulin, T. Ye. (1971). Vybor optimal'nogo varianta organizatsii vagonopotokov metodom dinamicheskogo programmirovaniya. *Trudy MIIT*, 362, 18-35. (in Russian)
20. Karamyshev, D. M. (1910). O rabote sortirovochnogo parka. *Izvestiya obshchego byuro soveshchatelnykh sezdov*, 1; 2, 45; 129. (in Russian)
21. Kislyakov, N. T., & Tikhomirov, I. G. (1934). *Organizatsiya zheleznodorozhnykh perezovok*. Moskva: Transzheldorizdat. (in Russian)
22. Kovrov, P. A. (1961). K raschetu effektivnosti otpravitelskoy marshrutizatsii. *Voprosy ekspluatatsii zheleznykh dorog*, 182, 106-127. (in Russian)
23. Korbut, A. A., & Finkelshteyn, Yu. Yu. (1969). *Diskretnoe programmirovaniye*. Moscow: Nauka. (in Russian)
24. Kochnev, F. P., Maksimovich, B. M., Pomerantsev, V. V., Tikhonov, K. K., & Chernomordik, G. I. (1958). *Organizatsiya dvizheniya na zheleznodorozhnom transporte: uchebnyk dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta*. Moscow: Transzheldorizdat. (in Russian)
25. Kochnev, F. P., Tikhonov, K. K., & Chernomordik, G. I. (1963). *Organizatsiya dvizheniya na zheleznodorozhnom transporte: uchebnyk dlya vuzov*. Moscow: Transzheldorizdat. (in Russian)
26. Krauze, A. (1894). O merakh k uskoreniyu dostavki gruzov po zheleznykh dorogam. *Inzhener*, 4, 172-176. (in Russian)

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

27. Kurbatova, A. V., & Kurbatov, F. S. (2012). Zhelezнодороzhnyy transport Rossii i SShA v pokazatelyakh ispolzovaniya putevoy infrastruktury, podvizhnogo sostava i proizvoditelnosti truda. *Rossiya i mir*, 4, 118-130. (in Russian)
28. Kutukova, G. A. (1958). Raschet pokazateley zadannogo varianta plana formirovaniya na ETsVM. *Vestnik VNIIZhTa*, 1, 60-62. (in Russian)
29. Kutyркиn, A. V., & Vasilev, V. I. (1980). Raschet optimalnogo plana formirovaniya odnogruppykh poezdov metodom vetvey i granits. *Vestnik VNIIZhTa*, 7, 49-54. (in Russian)
30. Kutyркиn, A. V. (1981). Dinamicheskaya model planirovaniya i operativnogo upravleniya vagonopotokami. *Vestnik VNIIZhTa*, 8, 7-13. (in Russian)
31. Kutyркиn, A. V. (1983). Algoritmy operativnoy korektyrovki plana formirovaniya poezdov. *Vestnik VNIIZhTa*, 8, 1-6. (in Russian)
32. Larionov, V. S. (1927). K voprosu o spetsializatsii tovarnykh poezdov. *Trudy MIITa*, V, 251; 288. (in Russian)
33. Larionov, B. C. (1947). Novyy metod rascheta plana formirovaniya. *Zhelezнодороzhnyy transport*, 10, 12-15. (in Russian)
34. Levin, D. Yu. (1977). Organizatsiya porozhnykh vagonopotokov so stantsiy vygruzki. *Vestnik VNIIZhTa*, 7, 46-48. (in Russian)
35. Manos, I. Ya., & Frolov, A. N. (1926). *Obshchiy kurs ekspluatatsii zheleznykh dorog*. Moscow, Leningrad: Gosudarstvennoe izdanie. (in Russian)
36. Mikhelson, K. P. (1937). Lzhenauka v ekspluatatsii zheleznykh dorog pod prikrytiem «matematiki». *Trudy MIITa*, 50, 51-82. (in Russian)
37. *Nastavlenie o spetsializatsii tovarnykh poezdov*. (1925). Moscow: Moskovsko-Kazanskaya zheleznyaya doroga. (in Russian)
38. Negrey, V. Y., & Shkuryin, K. M. (2018). Synergetic approach to the calculation of one-group train formation plan. *Science and Transport Progress*, 5(77), 53-64. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/147718> (in Russian)
39. Neyshtadt, S. I. (1934). Transport, rabotayushchiy na predele. *Ekspluatatsiya zheleznykh dorog*, 6, 14-17. (in Russian)
40. Nurmukhamedov, R. Z. (1982). Issledovanie voprosov rascheta plana formirovaniya poezdov v rayone mestnoy raboty. *Trudy TashIIT*, 176/23, 69-81. (in Russian)
41. Okipnyy, L. D., & Pokavkin, V. A. (1985). Effektivnost operativnoy organizatsii vagonopotokov. *Zhelezнодороzhnyy transport*, 11, 13-16 (in Russian)
42. Orlov, V. N., & Povorozhenko, V. V. (1943). *Tekhniko-ekonomicheskie raschety po organizatsii zhelezнодороzhnykh perevozok*. Moscow: Transzheldorizdat. (in Russian)
43. Osipov, V. T. (1958). *Otpravitel'skaya marshrutizatsiya na zhelezнодороzhnom transporte*. Moscow: Transzheldorizdat. (in Russian)
44. Osminin, A. T. (2010). Razvitie teorii i metodov rascheta plana formirovaniya poezdov. *Zhelezнодороzhnyy transport*, 10, 31-39. (in Russian)
45. Petrov, A. P., & Cherenin, V. P. (1948). Uovershenstvovanie metoda sostavlenniya plana formirovaniya poezdov. *Zhelezнодороzhnyy transport*, 3, 60-71. (in Russian)
46. Petrov, A. P. (1950). *Plan formirovaniya poezdov: Opyt, teoriya, metodika raschetov*. Moscow: Transzheldorizdat. (in Russian)
47. Petrov, A. P. (1958). Primenenie elektronnykh vychislitelnykh mashin na zhelezнодороzhnom transporte. *Vestnik VNIIZhTa*, 1, 8-18. (in Russian)
48. Povorozhenko, V. P., Bergard, K. A., & Glikman, M. S. (1948). Ekspluatatsionnye trebovaniya k razmeshcheniyu sortirovochnykh stantsiy. *Trudy VNIIZhTa*, 25, 289. (in Russian)
49. Pokavkin, V. A. (1961). K voprosu ob effektivnosti gruppyvovoy tekhnicheskoy marshrutizatsii perevozok. *Sbornik nauchnykh trudov RIIZhT*, 30, 93-143. (in Russian)
50. Pokavkin, V. A. (1973). Raschet plana formirovaniya odnogruppykh poezdov modifitsirovannym metodom posledovatel'nogo priblizheniya. *Trudy RIIZhTa*, 98, 25-68. (in Russian)
51. Pokavkin, V. A., & Meleshko, V. N. (1985). Operativnoe naznachenie gruppyvovoykh poezdov i ispolzovanie differentsirovannykh mass poezdov v sisteme optimalnoy organizatsii vagonopotokov. *Voprosy uvelicheniya propusknoy i provoznoy sposobnosti zheleznykh dorog*, 182, 51-57. (in Russian)
52. Popov, A. I. (1966). Algoritmy i programma rascheta plana formirovaniya odnogruppyvovoykh poezdov na EVM po metodu napravlennoy pereboru variantov. *Trudy MIITa*, 229, 68. (in Russian)

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

53. Prokhorchenko, A. V. (2014). Investigation of scale-invariant property of organization system of train traffic volume based on the percolation theory. *Science and Transport Progress*, 5(53), 56-64. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2014/30471> (in Russian)
54. Rikhter, I. I. (1883). *Ocherk mer, umenshayushchikh raskhody sodержaniya i ekspluatatsii zheleznykh dorog*. St. Petersburg. (in Russian)
55. Saenko, V. G., & Del, Rio B. (1953). Vybora optimalnogo varianta plana formirovaniya odnogruppykh poezdov. *Zheleznodorozhnyy transport*, 9, 78-85. (in Russian)
56. Sokovich, V. A. (1916). Vliyaniye prostoye vagonov na sortirovochnykh stantsiyakh v zavisimosti ot chisla sortiruemykh napravleniy. *Vestnik Yekaterininskoy zheleznoy dorogi*, 462/30, 1-5. (in Russian)
57. Sokovich, V. A. (1929). *Zheleznodorozhnye perezovki: Osnovy organizatsii*. Moscow: Transpechat NKPS. (in Russian)
58. Sokovich, V. A., Poshivaylo, I. N., Grankvist, V. V., & Kolesnikov, N. P. (1941). *Organizatsiya dvizheniya na zheleznodorozhnom transporte: uchebnyy dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta*. (Vol. 1-2). Moscow: Transzheldorizdat. (in Russian)
59. Stopichev, S. G. (1959). Nakhozhdeniye optimalnogo varianta plana formirovaniya odnogruppykh tekhnicheskikh marshrutov. *Vestnik VNIIZhT*, 4, 19-23. (in Russian)
60. Strelko, O. G. (2015). The analysis of the professor O. M. Frolov's scientific heritage (1863-1939) in the field of railway operation. *Scholarly Works of the Faculty of History, Zaporizhzhya National University*, 4, 361-364. (in Russian)
61. Robel, R. I. (Ed.). (1956). *Tekhnicheskyy spravochnyk zheleznodorozhnika. Vol. 13: Ekspluatatsiya zheleznykh dorog*. Moscow: Transzheldorizdat. (in Russian)
62. Tikhonov, K. K. (1962). *Tekhniko-ekonomicheskie raschety v ekspluatatsii zheleznykh dorog*. Moscow: Vsesoyuzno izdatel'sko-poligraficheskoye ob'edineniye Ministerstva putey soobshcheniya. (in Russian)
63. Tulupov, L. P. (1953). Raschet plana formirovaniya poezdov s pomoshchyu vspomogatelnykh tablits. *Trudy MIITa*, 79, 150-165. (in Russian)
64. Ugryumov, A. K. (1953). Sovershenstvovaniye metodov rascheta plana formirovaniya. *Zheleznodorozhnyy transport*, 6, 58-66. (in Russian)
65. Frolov, A. N. (1901). Obshchie mysl' o prostoye vagonov na sortirovochnykh stantsiyakh. *Inzhener*, 5, 235-238 (in Russian)
66. Frolov, A. N. (1903). Novaya ideya khlebnoy mobilizatsii. *Vestnik Saratovskogo otdeleniya RTO*, 3, 41. (in Russian)
67. Frolov, A. N. (1903). Obshchie soobrazheniya o prostoye vagonov na sortirovochnykh stantsiyakh. *XX Soveshchatelnyy sezd inzhenerov sluzhby puti russkikh zheleznykh dorog 1902 g. Protokoly zasedaniy i trudy*, 157-165. (in Russian)
68. Frolov, A. N. (1903). *Obshchie soobrazheniya o prostoye vagonov v sortirovochnoy stantsii*. Saratov. (in Russian)
69. Frolov, A. N. (1906). *Sbornik statey, kasayushchikhsya stantsiy i manevrov*. Saratov. (in Russian)
70. Frolov, A. N. (1921). K voprosu o vzaimodeystvii sortirovochnykh stantsiy. *Tekhnika i ekonomika putey soobshcheniya*, 8, 19-24. (in Russian)
71. Cherenin, V. P. (1949). *Schetnaya mashina dlya sostavleniya plana formirovaniya poezdov : Izobreteniye № 405197-1U. 1.X. Avtorskoye svidetel'stvo ot 24.01.1951*. (in Russian)
72. Cherenin, V. P. (1954). Mekhanizatsiya raschetov po sostavleniyu plana formirovaniya poezdov. *Tekhnika zheleznykh dorog*, 1, 22-24. (in Russian)
73. Cherenin, V. P. (1962). Algoritm i programma posledovatelynykh raschetov plana formirovaniya. Sostavleniye plana formirovaniya poezdov na elektronnykh mashinakh. *Trudy VNIIZhTa*, 247, 113-131. (in Russian)
74. Chernov, G. I. (1978). Optimalnoye raspredeleniye porozhnykh tsistern na poligone dorogi. *Zheleznodorozhnyy transport*, 1, 10-14. (in Russian)

Поступила в редколлегию: 30.01.2020

Принята в печать: 02.06.2020

УДК 629.421:656.22

В. І. МАЦЮК^{1*}, В. К. МИРОНЕНКО^{2*}, Я. П. ПЕТИНОВ^{3*}

^{1*}Каф. «Технології транспорту та управління процесами перевезень», Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Котельникова, 29/18, Київ, Україна, 03115, тел. +38 (044) 409 24 41, ел. пошта vimatsiuk@gmail.com, ORCID 0000-0003-2355-2564

^{2*}Каф. «Управління комерційною діяльністю залізниць», Державний університет інфраструктури та технологій, вул. Котельникова, 29/18, Київ, Україна, 03115, тел. +38 (044) 409 24 41, ел. пошта pupil7591@gmail.com, ORCID 0000-0002-6088-3867

^{3*}Департамент локомотивного господарства, АТ «Укрзалізниця», вул. Єжи Гедройця, 5, Київ, Україна, 03150, тел. +38 (044) 309 70 05, ел. пошта ustas.ural@ukr.net, ORCID 0000-0002-2383-5815

КОНЦЕПЦІЯ РЕГЛАМЕНТУ ДОСТУПУ ПРИВАТНИХ ПОЇЗНИХ ЛОКОМОТИВІВ ДО ЗАЛІЗНИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ЗАГАЛЬНОГО КОРИСТУВАННЯ

Мета. Дослідження спрямовано на отримання нових знань про структуру типового нормативно-технологічного документа (регламенту) доступу поїзних локомотивів приватної форми власності до залізничної інфраструктури загального користування. **Методика.** Для отримання релевантних емпіричних даних автори провели огляд попередніх досліджень за темою роботи з використанням повнотекстових і реферативних баз даних. Відповідно до принципів системного аналізу та математичної логіки розроблено структурно-логічні моделі порядку взаємодії підрозділів оператора (власника) залізничної інфраструктури загального користування та представників власника приватних локомотивів. **Результати.** Автори довели: 1) регламентом доступу приватних поїзних локомотивів до інфраструктури загального користування є певний порядок (технологічний процес) взаємодії власника-оператора приватних локомотивів із підрозділами власника інфраструктури (диспетчерсько-оперативний персонал, працівники комерційного та вагонного господарств); 2) до структури типового регламенту входять блоки: технологічного процесу, порядку оформлення перевізних документів і нарахування перевізної плати, порядку експлуатації приватних локомотивів і підготовки до рейсу локомотивних бригад; порядку дій і відповідальність сторін у випадках виникнення позаштатних ситуацій. **Наукова новизна.** У роботі вдосконалено моделі організації вагонопотоків і руху поїздів на залізницях загального користування, які, на відміну від наявних, передбачають нецентралізоване управління парком поїзних локомотивів. **Практична значимість.** Дослідження відкриває можливість безпосереднього застосування на практиці запропонованих моделей під час складання регламенту доступу приватних поїзних локомотивів до залізничної інфраструктури загального користування. Свідченням цьому є їх практична апробація у відповідному пілотному проекті на одному із залізничних напрямків України. За результатами дослідження: 1) визначено потрібну структуру регламенту доступу приватних поїзних локомотивів до залізничної інфраструктури загального користування; 2) створено порядок взаємодії підрозділів власника (оператора) залізничної інфраструктури загального користування та операторів локомотивної тяги (власників приватних локомотивів).

Ключові слова: приватний поїзний локомотив; регламент доступу; залізничний транспорт; вантажні перевезення; залізнична інфраструктура

Вступ

До завдань Національної транспортної стратегії України на період до 2030 р., схваленої розпорядженням Кабінету Міністрів України від 30 травня 2018 р. № 430-р, належать: лібералізація ринку залізничних перевезень на основі рівноправного доступу до залізничної інфраструктури та справедливої конкуренції між перевізниками; запровадження механізму допу-

ску до ринку залізничних перевезень перевізників різних форм власності (ліцензування, сертифікація, безпека).

На окремих залізничних напрямках перевезень масових вантажів під час організації маршрутних відправок існує гостра виробнича необхідність у використанні власних (приватних) поїзних локомотивів для вивезення вагонів із пунктів навантаження до найближчих (попут-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

них) технічних станцій. Сама потреба виникає через:

1. Гостру нестачу локомотивів та локомотивних бригад, що належать АТ «Укрзалізниця».

2. Відсутність відпрацьованих механізмів та технологічних моделей взаємодії власників приватних локомотивів із АТ «Укрзалізниця», які б забезпечили їх вчасне подавання у пункти накопичення вантажної маси, формування та відправлення технологічних маршрутів.

3. Природну особливість залізничного транспорту, що призводить до значних перепростоїв вагонів у пунктах накопичення, формування та відправлення поїздів і зміни локомотивів.

4. Відсутність достатньої мотивації АТ «Укрзалізниця» у вчасному подаванні локомотивів у пункти формування маршрутів через монополне становище в частині організації перевізної роботи на залізничних напрямках загального користування.

Використання приватної локомотивної тяги ускладнюється відсутністю нормативної та регуляторної баз для забезпечення можливості доступу поїзних локомотивів власності не АТ «Укрзалізниця» до залізничної транспортної інфраструктури загального користування, що надає проблематиці важливої актуальності.

Мета

Відповідно до зазначеного метою роботи є:

Дослідити та обґрунтувати необхідність розробки механізму доступу приватних поїзних локомотивів до залізничної інфраструктури загального користування.

Розробити типову концептуальну модель технологічного процесу доступу приватних поїзних локомотивів до інфраструктури загального користування у вигляді регламенту взаємодії учасників перевізного процесу.

Методика

Система організації вагонопотоків на залізничному транспорті загального користування через об'єктивні причини проходить природний процес перетворення. До головних причин таких змін можна віднести поступову лібералізацію ринку залізничних вантажних перевезень, особливо в частині доступу до інфраструктури загального користування залізниць приватних

вантажних вагонів. Тим більше зазначені вище процеси перетворень ускладнюються у зв'язку з пропозиціями Міністерства інфраструктури допустити до залізничної мережі АТ «Укрзалізниця» поїзні локомотиви приватних форм власності.

Із метою отримання та обробки емпіричних даних автори провели огляд попередніх досліджень із застосуванням повнотекстових і реферативних баз даних. Оцінка технічної можливості використання приватних локомотивів на залізничних напрямках загального користування у дослідженні [6] виконана з частковим аналізом національного законодавства відповідної тематики, однак не подано практичних рекомендацій для його використання.

В інших дослідженнях представлені пріоритетні залізничні напрямки України для використання приватної локомотивної тяги [17], однак не зазначено конкретних заходів щодо реалізації цієї ідеї.

У дослідженнях [20, 22] наведено аналіз практичного досвіду лібералізації національних залізниць Мексики, Аргентини та США, у тому числі під час використання приватної локомотивної тяги.

У дослідженнях [1, 7, 15, 16, 19, 21] встановлено ключове значення вивізних та передавальних поїзних локомотивів для забезпечення надійності транспортного сполучення на залізницях. Однак у цих дослідженнях не розглядався варіант використання приватної локомотивної тяги.

Ураховуючи те, що саме поїзні локомотиви є ключовими технологічними елементами надійності транспортного сполучення [18], процес організації доступу та їх подальша експлуатація в частині взаємодії з підрозділами АТ «Укрзалізниця» (як власника залізничної інфраструктури загального користування) є одним із найважливіших.

Тому основна проблема допуску приватних поїзних локомотивів до інфраструктури загального користування на сьогодні полягає у:

– відсутності досвіду на українських залізницях розробки та впровадження регламентів, правил, технологічних норм, нормативних положень тощо з організації доступу приватних поїзних локомотивів до залізничної інфраструктури загального користування, у тому числі

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

під час організації руху вантажних поїздів на залізничних напрямках;

– необхідності визначення структури типового регламенту порядку доступу приватних поїзних локомотивів до окремих напрямків (або всієї мережі) залізничної інфраструктури загального користування.

До важливих об'єктів зазначеного процесу належать усі лінійні підрозділи (підприємства), що беруть участь в організації руху поїздів. Тому, по суті, регламентом доступу приватних поїзних локомотивів до інфраструктури загального користування буде певний порядок (технологічний процес) взаємодії власника-оператора приватних локомотивів із відповідними підрозділами АТ «Укрзалізниця» (рис. 1).



Рис. 1. Структурно-логічна схема технологічного процесу взаємодії власника приватних локомотивів та підрозділів власника інфраструктури загального користування

Fig. 1. Structural and logical scheme of the technological process of interaction between the owner of private locomotives and units of the owner of public infrastructure

Разом із тим, зміст відповідних регламентів повинен містити розділи, що формалізують детальний технологічний процес порядку дій працівників власника інфраструктури та власника поїзних локомотивів, порядку оформлення перевізних документів та нарахування перевізної плати (або визначення плати за перевезення) під час організації поїздів із приватними локомотивами, порядку експлуатації приватних поїзних локомотивів та підготовки до рейсу відповідних локомотивних бригад (рис. 2).

З урахуванням світового досвіду у створенні аналогічних систем функціонування приватних

локомотивів у залізничній інфраструктурі загального користування та особливостей національного законодавства експлуатація приватних локомотивів і робота локомотивних бригад повинна ґрунтуватися на таких документах:

- Закон України «Про транспорт» [3];
- Закон України «Про залізничний транспорт» (зі змінами та доповненнями) [2];
- Постанова Кабінету Міністрів України від 01.03.2010 № 193 «Про затвердження Технічного регламенту надання послуг з перевезення пасажирів та вантажів залізничним транспортом» [14];

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

– Постанова Кабінету Міністрів України від 11.07.2013 № 494 «Про затвердження Технічного регламенту безпеки інфраструктури залізничного транспорту» [9];

– Технічний регламент безпеки рухомого складу залізничного транспорту, затверджений постановою Кабінету Міністрів України від 30.12.2015 № 1194 (далі – Технічний регламент) [14];

– Правила технічної експлуатації залізниць України, затверджені наказом Міністерства транспорту України від 20.12.1996 [12];

– нормативно-технічні документи, які відповідно до Технічного регламенту та ПТЕ регламентують порядок експлуатації та ремонту приватних локомотивів на залізничній магістралі загального користування [4, 5, 8, 10, 11, 13].



Рис. 2. Концептуальна структурно-логічна схема технологічного процесу взаємодії власника приватних локомотивів та підрозділів власника інфраструктури залізничного транспорту загального користування

Fig. 2. Conceptual structural and logical scheme of the technological process of interaction between the owner of private locomotives and units of the owner of public railway infrastructure

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Окремої уваги вимагають питання експлуатації, технічного обслуговування та ремонту приватних локомотивів. При цьому має місце низка чинників, які потребують розробки додаткових нормативно-технічних документів (інструкцій, регламентів), що забезпечували б виконання та контроль проходження поточних технічних оглядів і ремонтів приватних локомотивів в усіх можливих ситуаціях на практиці з урахуванням:

конкретних серій приватних локомотивів;

фактичної наявності у власника приватних локомотивів виробничих потужностей та персоналу належної кваліфікації для виконання технічних оглядів та ремонтів, атестованих для відповідних серій локомотивів у порядку, встановленому нормами власника залізничної інфраструктури;

порядку технічного та технологічного забезпечення виконання технічних оглядів і ремонтів за відсутності у власника приватних локомотивів потрібних потужностей, персоналу;

розробки та впровадження системи контролю з боку власника залізничної інфраструктури загального користування, повноти та якості виконання технічних оглядів і ремонтів приватних локомотивів;

установлення порядку пересилання локомотивів у ремонт (технічний огляд), із ремонту (технічного огляду); передачі їх між операторами приватної локомотивної тяги або між оператором локомотивної тяги та власником залізничної інфраструктури.

Результати

Унаслідок результату представленого дослідження визначено типові нормативно-правові та структурно-технологічні моделі регламенту доступу приватних локомотивів до залізничної інфраструктури загального користування. Дослідженнями показало, що деякі нормативно-правові документи потребують удосконалення з урахуванням сучасних потреб у забезпеченні доступу приватної тяги до мережі залізниць загального користування.

Установлено ключові технічні та технологічні елементи експлуатаційної діяльності залізничного транспорту загального користування, які обумовлюють порядок доступу до неї при-

ватної тяги з належним забезпеченням безпеки руху поїздів.

Обґрунтовано порядок практичної реалізації запропонованих моделей у регламенти доступу приватної тяги до залізниць загального користування.

Наукова новизна та практична значимість

Навим у дослідженні є удосконалення моделей організації вагонопотоків і руху поїздів на залізницях загального користування, які на відміну від наявних передбачають нецентралізоване управління локомотивним парком поїзних локомотивів.

Практична значимість дослідження полягає в можливості безпосереднього застосування на практиці запропонованих типових моделей під час створення рекомендацій для складання регламентів доступу приватних поїзних локомотивів до залізничної інфраструктури загального користування. За результатами дослідження:

1) визначено потрібну структуру регламенту доступу приватних поїзних локомотивів до тяги поїздів на дільницях залізничної інфраструктури загального користування;

2) створено порядок взаємодії підрозділів власника (оператора) залізничної інфраструктури загального користування та операторів локомотивної тяги (власників приватних локомотивів).

Практична значимість матеріалів статті також підтверджується впровадженням зазначених результатів дослідження у виробничий процес ТОВ «ЛОКО-ІНВЕСТ» і ТОВ «ЛЕМТРАНС» у залізничній транспортній інфраструктурі загального користування на ділянці Енергодар – Таврійськ Запорізької дирекції залізничних перевезень регіональної філії «Придніпровська залізниця» АТ «Укрзалізниця».

Висновки

Для кожного окремого власника приватних локомотивів має бути розроблений порядок (регламент) доступу приватних локомотивів та локомотивних бригад до залізничної інфраструктури загального користування, який буде забезпечувати виконання норм і правил ремон-

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

ту й технічного огляду відповідних локомотивів, установлених їх як заводом-виробником, так і власником залізничної інфраструктури. Крім того, національне законодавство повинно регулювати більшість виробничих ситуацій взаємодії власника локомотивів і власника залізничної інфраструктури.

Типовий варіант регламенту повинен складатися з блоків, що визначають технологічний процес організації руху поїздів із приватним

локомотивом та локомотивними бригадами власника цього локомотива; установлюють порядок підготовки перевізних документів і методику нарахування перевізної плати; порядок експлуатації (виконання технічних оглядів та ремонтів) приватних локомотивів і підготовки до рейсу відповідних локомотивних бригад; порядку дій і відповідальність сторін у випадках виникнення позаштатних ситуацій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Боднар Б. Є., Очкасов О. Б., Гришечкіна Т. С., Боднар Є. Б. Оцінка роботи локомотивного парку з використанням методів зменшення розмірності. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. № 6 (84). С. 45–59. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/195762>
2. Закон України «Про залізничний транспорт» (із змінами та доповненнями). *Відомості Верховної Ради України (ВВР)*, 1996. № 40, ст. 183. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/273/96-вр>
3. Закон України «Про транспорт» (із змінами та доповненнями). *Відомості Верховної Ради України (ВВР)*, 1994. № 51, ст. 446. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/232/94-вр>
4. *Збірник тарифів на перевезення вантажів залізничним транспортом у межах України та пов'язані з ними послуги*. [Чинний від 2009-03-26]. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0340-09#n32>
5. *Інструкція з технічного обслуговування електровозів і тепловозів в експлуатації : ЦТ-0056*. Київ : «Поліграфсервіс», 2003. 160 с.
6. Козаченко Д. М., Очкасов О. Б., Шепотенко А. П., Санницький Н. М. Перспективи використання приватних локомотивів для перевезення вантажів у напрямку морських портів. *Наука та прогрес транспорту*. 2017. № 6 (72). С. 7–19. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/118196>
7. Мацюк В. І. Дослідження повної та систематичної технологічних відмов залізничних станцій. *Збірник наукових праць ДЕГУТ. Серія : Транспортні системи і технології*. 2017. Вип. 30. С. 226–236.
8. *Правила оформлення перевізних документів*. Наказ Міністерства транспорту України від 21.11.2000 № 644 (у редакції наказу Міністерства інфраструктури України 08.06.2011 р. № 138 та зі змінами). URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0863-00>
9. *Про затвердження Технічного регламенту надання послуг з перевезення пасажирів та вантажів залізничним транспортом* : Постанова Кабінету Міністрів України від 01.03.2010 р. № 193. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/193-2010-п>
10. *Тимчасове положення про порядок допуску приватних локомотивів до роботи окремими маршрутами на залізничних коліях загального користування* : Наказ МІУ № 191 від 04.03.2020. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0278-20#Text>
11. *Правила перевезення вантажів*. Наказ Міністерства транспорту України від 09.12.2002 р. № 873 (зі змінами). URL: <https://goo-gl.su/3InEU>
12. *Правила технічної експлуатації залізниць України*. Наказ Міністерства транспорту України від 20.12.1996 р. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0050-97>
13. *Практичні рекомендації щодо складання технологічного процесу роботи дільничної станції*. Наказом Укрзалізниці від 03.03.2010 р. № 163-Ц URL: http://zalp.org.ua/images/stories/Dokuments/Instrukcii/Cd_0082.zip
14. *Технічний регламент безпеки рухомого складу залізничного транспорту*. Наказ Міністерства транспорту України від 15.12.2015 р. № 1194. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1194-2015-п>
15. Ходоскіна О. А., Матюшкова Ю. В. Роль обновления операционной системы в оптимизации работы железнодорожной станции. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. № 1 (79). С. 26–38. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/159608>
16. Bodnar B. E., Ochkasov O. B., Bodnar E. B., Hryshechkina T. S., Ocheretnyuk M. V. Simulation of locomotive repair organization by the methods of queue systems theory. *Наука та прогрес транспорту*. 2018. № 5 (77). С. 28–40. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/147740>

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

17. Kozachenko D., Gera B., Sannytskyi N., Hermaniuk Y., Shargun T. Estimation of Private Locomotives Usage Efficiency for Freight Transportation in Ukraine. *MATEC Web of Conferences*. 2019. Vol. 294. P. 1–6. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929406001>
18. Matsiuk V. A Study of the technological reliability of railway stations by an example of transit trains processing. *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies : Control processes*. 2017. Vol. 1. P. 12–17. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.91074>
19. Matsiuk V., Myronenko V., Horoshko V., Prokhorchenko A., Hrushevska T., Shcherbyna R., ... Tymchenko N. Improvement of efficiency in the organization of transfer trains at developed railway nodes by implementing a "flexible model". *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies : Control processes*. 2019. Vol. 2, № 3 (98). P. 32–39. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.162143>
20. Müller A., Aragonés V. Details of a similar aspiration : Privatized railroad in Argentina, deregulated railroad in the USA. *Research in Transportation Business & Management*. 2013. Vol. 6. P. 51–61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2012.12.001>
21. Nesterenko H. I., Bech P. V., Muzykin M. I., Avramenko S. I. Improvement of supervisory control of train movement by means of introduction of operational zones. *Science and Transport Progress*. 2018. № 6 (78). P. 26–38. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/154060>
22. Villa J. C., Sacristán-Roy E. Privatization of Mexican railroads : Fifteen years later. *Research in Transportation Business & Management*. Vol. 6. P. 45–50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2012.11.012>

В. И. МАЦЮК^{1*}, В. К. МИРОНЕНКО^{2*}, Я. П. ПЕТИНОВ^{3*}

^{1*}Каф. «Технологии транспорта и управление процессами перевозок», Государственный университет инфраструктуры и технологий, ул. Котельникова, 29/18, Киев, Украина, 03115, тел. +38 (044) 409 24 41, эл. почта vimatsiuk@gmail.com, ORCID 0000-0003-2355-2564

^{2*}Каф. «Управление коммерческой деятельностью железных дорог», Государственный университет инфраструктуры и технологий, ул. Котельникова, 29/18, Киев, Украина, 03115, тел. +38 (044) 409 24 41, эл. почта pupil7591@gmail.com, ORCID 0000-0002-6088-3867

^{3*}Департамент локомотивного хозяйства, АО «Укрзалізниця», ул. Ежи Гедройца, 5, Киев, Украина, 03150, тел. +38 (044) 309 70 05, эл. почта ustas.ural@ukr.net, ORCID 0000-0002-2383-5815

КОНЦЕПЦИЯ РЕГЛАМЕНТА ДОСТУПА ЧАСТНЫХ ПОЕЗДНЫХ ЛОКОМОТИВОВ К ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЕ ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ

Цель. Исследование направлено на получение новых знаний о структуре типового нормативно-технологического документа (регламента) доступа поездных локомотивов частной формы собственности к железнодорожной инфраструктуре общего пользования. **Методика.** Для получения релевантных эмпирических данных авторы провели обзор предыдущих исследований по теме работы с использованием полнотекстовых и реферативных баз данных. В соответствии с принципами системного анализа и математической логики разработаны структурно-логические модели порядка взаимодействия подразделений оператора (владельца) железнодорожной инфраструктуры общего пользования и представителей собственника частных локомотивов. **Результаты.** Авторы доказали: 1) регламентом доступа частных поездных локомотивов к инфраструктуре общего пользования является определённый порядок (технологический процесс) взаимодействия владельца-оператора частных локомотивов с подразделениями владельца инфраструктуры (диспетчерско-оперативный персонал, работники коммерческого и вагонного хозяйств); 2) в структуру типового регламента входят блоки: технологического процесса, порядка оформления перевозочных документов и начисления перевозочной платы, порядка эксплуатации частных локомотивов и подготовки к рейсу локомотивных бригад; порядка действий и ответственность сторон в случае возникновения нештатных ситуаций. **Научная новизна.** В работе усовершенствованы модели организации вагонопотоков и движения поездов на железных дорогах общего пользования, которые, в отличие от существующих, предполагают децентрализованное управление локомотивным парком поездных локомотивов. **Практическая значимость.** Исследование открывает возможность непосредственного применения на практике предложенных моделей при создании регламента доступа частных поездных локомотивов к железнодорожной инфраструктуре общего пользования.

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

зовання. Свідельством цього являється їх практична апробація в відповідному пілотному проекті на одному з залізничних напрямків України. По результатам дослідження: 1) визначена необхідна структура регламенту доступу приватних поїзних локомотивів до залізничної інфраструктури загального користування; 2) створено порядок взаємодії підрозділів власника (оператора) залізничної інфраструктури загального користування та операторів локомотивної тяги (власників приватних локомотивів).

Ключові слова: приватний поїзний локомотив; регламент доступу; залізничний транспорт; вантажні перевезення; залізнична інфраструктура

V. I. MATSIUK^{1*}, V. K. MYRONENKO^{2*}, Y. P. PETINOV^{3*}

^{1*}Dep. «Transport Technology and Transportation Process Management», State University of Infrastructure and Technologies, Kotelnikova St., 29/18, Kyiv, Ukraine, 03115, tel. +38 (044) 409 24 41, e-mail vimatsiuk@gmail.com, ORCID 0000-0003-2355-2564

^{2*}Dep. «Management of Railway Commercial Activities», State University of Infrastructure and Technologies, Kotelnikova St., 29/18, Kyiv, Ukraine, 03115, tel. +38 (044) 409 24 41, e-mail pupil7591@gmail.com, ORCID 0000-0002-6088-3867

^{3*}Lokomotive Department, Ukrzaliznytsia JSC, Yezhy Hedroitsia St., 5, Kyiv, Ukraine, 03150, tel. +38 (044) 309 70 05, e-mail ustas.ural@ukr.net, ORCID 0000-0002-2383-5815

CONCEPT OF REGULATIONS FOR ACCESS OF PRIVATE LOCOMOTIVES TO PUBLIC RAILWAY INFRASTRUCTURE

Purpose. Scientific research is aimed at gaining new knowledge about the structure of a typical regulatory and technological document (regulation) of access for private-owned train locomotives to public railway infrastructure. **Methodology.** To obtain relevant empirical data, the authors performed a review of previous studies on the topic of work using full-text and abstract databases. In accordance with the principles of system analysis and mathematical logic, structural-logical models of the order of interaction between the units of the operator (owner) of the public railway infrastructure and representatives of the owner of private locomotives have been developed. **Findings.** The authors proved: 1) the regulation of access of private train locomotives to public infrastructure is a certain procedure (technological process) for the interaction of the owner (operator) of private locomotives with the units of the owner of the infrastructure (dispatch or operational personnel, employees of commercial and carriage facilities); 2) the structure of the typical regulation includes the following blocks: the technological process, the procedure for processing transportation documents and charging fees, the procedure for operating private locomotives and preparing of locomotive's foot-plate staff for the tour; the procedure and responsibility of the parties in case of emergency situations. **Originality** lies in improving the models for the organization of railway carriage traffic volumes and the movement of trains on public railways, which, unlike the existing ones, imply the decentralized management of the locomotive fleet. **Practical value** lies in the possibility of direct practical application of the proposed models for the creation of standard recommendations for drawing up rules for the access of private locomotives to the hauling operations on the public railway infrastructure and their practical testing in the corresponding pilot project on one of the railway lines in Ukraine. According to the research results: 1) the necessary structure of the access regulation of private train locomotives to the public railway infrastructure was determined; 2) a logical order for interpreting the interaction between the relevant units of the owner (operator) of the public railway infrastructure and locomotive traction operators (owners of private locomotives) has been created.

Keywords: private locomotive; access regulations; railway transport; cargo transportations; railway infrastructure

REFERENCES

1. Bodnar, B. Ye., Ochkasov, O. B., Grushechkyna, T. S., & Bodnar, Ye. B. (2019). Assessment of locomotive fleet operation using the methods of decreasing dimensions. *Science and Transport Progress*, 6(84), 45-59. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/195762> (in Ukrainian)
2. Zakon Ukrainy «Pro zaliznychnyi transport» (iz zminamy ta dopovnenniamy). (1996). *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy (VVR)*, 40, 183. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/273/96-вр> (in Ukrainian)
3. Zakon Ukrainy «Pro transport» (iz zminamy ta dopovnenniamy). (1994). *Vidomosti Verkhovnoi Rady Ukrainy (VVR)*, 51, 446. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/232/94-вр> (in Ukrainian)

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

4. *Zbirnyk taryfiv na perevezennia vantazhiv zaliznychnym transportom u mezhakh Ukrainy ta poviazani z nymy poslughy*. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0340-09#n32> (in Ukrainian)
5. *Instruktsiia z tekhnichnogo obslughovuvannia elektrovoziv i teplovoziv v ekspluatacii, 160 TsT-0056* (2003). Kiev: Poligrafservis. (in Ukrainian)
6. Kozachenko, D. M., Ochkasov, O. B., Shepotenko, A. P., & Sannitskyy, N. M. (2017). Prospects of the private locomotives usage for goods traffic in the direction of sea ports. *Science and Transport Progress*, 6(72), 7-19. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/118196> (in Ukrainian)
7. Matsiuk, V. I. (2017). Researches of complete and systematic technological failures of railway stations. *Zbirnyk naukovykh pracj Derzhavnogho ekonomiko-tekhnologichnogho universytetu transportu. Serija: Transportni systemy i tekhnologhiji*, 30, 226-236. (in Ukrainian)
8. *Pravyla oformlennja pereviznykh dokumentiv, No. 644*. (2000). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0863-00> (in Ukrainian)
9. «Pro zatverdzhennja Tekhnichnogho rehglamentu nadannja poslugh z perevezennja pasazhyriv ta vantazhiv zaliznychnym transportom», No. 193. (2010). Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/193-2010-p> (in Ukrainian)
10. «Tymchasove polozhennia pro poriadok dopusku pryvatnykh lokomotyviv do roboty okremymy marshrutamy na zaliznychnykh koliakh zahalnoho korystuvannia»: Nakaz MIU № 191 vid 04.03.2020. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0278-20#Text> (in Ukrainian)
11. *Pravyla perevezennia vantazhiv, No. 873 (zi zminamy)*. (2002). Retrieved from <https://goo-gl.su/3InEU> (in Ukrainian)
12. *Pravyl'a tekhnichnoi ekspluatacii zalizny`cz` Ukrayiny`*. Nakaz Ministerstva transportu Ukrayiny` vid 20.12.1996. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/z0050-97> (in Ukrainian)
13. *Praktychni rekomendacii shchodo skladannia tekhnologichnogho procesu roboty dilnychnoi stancii, No 163-C*. Nakaz Ukrzaliznytsi vid 03.03.2010. Retrieved from http://zalp.org.ua/images/stories/Dokuments/Instrukcii/Cd_0082.zip (in Ukrainian)
14. *Tekhnichni rehglament bezpeky rukhomoho skladu zaliznychnoho transport, No 1194*. Retrieved from <https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/1194-2015-p> (in Ukrainian)
15. Hodoskina, O. A., & Matyushkova, Y. V. (2019). The role of operating system upgrade in optimizing the operation of the railway station. *Science and Transport Progress*, 1(79), 26-38. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/159608> (in Russian)
16. Bodnar, B. E., Ochkasov, O. B., Bodnar, E. B., Hryshechkina, T. S., & Ocheretnyuk, M. V. (2018). Simulation of locomotive repair organization by the methods of queue systems theory. *Science and Transport Progress*, 5(77), 28-40. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/147740> (in English)
17. Kozachenko, D., Gera, B., Sannitskyy, N., Hermaniuk, Y., & Shargun, T. (2019). Estimation of Private Locomotives Usage Efficiency for Freight Transportation in Ukraine. *MATEC Web of Conferences*, 294, 1-6. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201929406001> (in English)
18. Matsiuk, V. (2017). A study of the technological reliability of railway stations by an example of transit trains processing. *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies: Control processes*, 1, 12-17. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2017.91074> (in English)
19. Matsiuk, V., Myronenko, V., Horoshko, V., Prokhorchenko, A., Hrushevska, T., Shcherbyna, R., ... & Tymchenko, N. (2019). Improvement of efficiency in the organization of transfer trains at developed railway nodes by implementing a «flexible model». *Eastern–European Journal of Enterprise Technologies: Control processes*, 2(3(98)), 32-39. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2019.162143> (in English)
20. Müller, A., & Aragonés, V. (2013). Details of a similar aspiration: Privatized railroad in Argentina, deregulated railroad in the USA. *Research in Transportation Business & Management*, 6, 51-61. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2012.12.001> (in English)
21. Nesterenko, H. I., Bech, P. V., Muzykin, M. I., & Avramenko, S. I. (2018). Improvement of supervisory control of train movement by means of introduction of operational zones. *Science and Transport Progress*, 6(78), 26-38. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/154060> (in English)
22. Villa, J. C., & Sacristán-Roy, E. (2013). Privatization of Mexican railroads: Fifteen years later. *Research in Transportation Business & Management*, 6, 45-50. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rtbm.2012.11.012> (in English)

Надійшла до редколегії: 03.02.2020

Прийнята до друку: 04.06.2020

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

УДК 625.14.031

Д. М. КУРГАН^{1*}, О. В. ГУБАР², М. О. ГАВРИЛОВ³

^{1*}Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, ел. пошта kurhan.d@gmail.com, ORCID 0000-0002-9448-5269

²Каф. «Колія та колійне господарство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 42, ел. пошта neris@ua.fm, ORCID 0000-0001-8683-5372

³Каф. «Проектування і будівництво доріг», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, ел. пошта maxgavrilla@gmail.com, ORCID 0000-0002-1321-170X

МЕТОДИКА ІНЖЕНЕРНОГО РОЗРАХУНКУ КОЕФІЦІЄНТА СТІЙКОСТІ ПРОТИ ВКОЧУВАННЯ КОЛЕСА НА РЕЙКУ

Мета. Одним із показників взаємодії колії й рухомого складу, недотримання якого може призвести до порушення безпеки руху, а саме до сходження, є умова забезпечення стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки. Метою цієї роботи є створення методики практичного інженерного розрахунку коефіцієнта стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки. Викладена методика буде мати вичерпну інформацію як із розрахункових формул, так і з довідкових матеріалів, для виключення необхідності залучення додаткових джерел та спеціального програмного забезпечення. **Методика.** Основною задачею реалізації поставленої мети є винесення на інженерний рівень розрахунку горизонтальних сил. Унаслідок складності процесу взаємодії колії та рухомого складу й необхідності врахування великої кількості факторів, що мають вплив на результат, як правило, для визначення горизонтальних сил застосовують складні динамічні моделі. Можливий розв'язок полягає в припущенні, що для конкретного типу рухомого складу горизонтальна сила може бути розрахована за лінійною залежністю від значення непогашеного прискорення. Для цього була використана аналітична методика розрахунку горизонтальних сил. **Результати.** Автори визначили відсутні коефіцієнти розрахунку горизонтальної сили залежно від непогашеного прискорення для деяких типів маневрових локомотивів та для вантажного вагона з урахуванням рівня його завантаження. **Наукова новизна.** У роботі набули подальшого розвитку науково-практичні підходи щодо аналізу взаємодії колії й рухомого складу в горизонтальній площині. **Практична значимість.** Запропонована покрокова методика розрахунку коефіцієнта стійкості дає можливість на інженерному рівні проводити практичний аналіз забезпечення запасу стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки, що необхідно під час розслідування причин сходження рухомого складу з рейок та для низки інших задач, пов'язаних із рухом у кривих ділянках колії.

Ключові слова: залізнична колія; крива; горизонтальна сила; бокова сила; коефіцієнт стійкості; вкочування колеса на рейку; непогашене прискорення; взаємодія колії й рухомого складу; безпека руху

Вступ

Одним із показників взаємодії колії й рухомого складу, недотримання якого може призвести до порушення безпеки руху, а саме до сходження, є умова забезпечення стійкості про-

ти вкочування гребеня колеса на головку рейки. Процес вкочування виникає внаслідок дії настільки значних горизонтальних сил, що, у супереч силам тертя й вертикального навантаження, вони підіймають колесо ребордою на рейку. Такі горизонтальні сили можуть виникнути

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

тільки під час руху в кривих ділянках колії [7, 20] і, як правило, за наявності відхилень від норм утримання рухомого складу або колії.

Основні положення методу розрахунку коефіцієнта стійкості проти вкочування гребеня колеса на рейки були закладені ще в роботах проф. Г. М. Шахунянца [16], проф. О. П. Єршкова [2], проф. М. А. Чернишова [15] та ін. Суттєвий розвиток дослідження за цим напрямом набули в роботах проф. Е. М. Сокола [12]. Сучасний вигляд розрахунків викладено в підручнику проф. Е. І. Даніленко [1]. Складність питання пояснює продовження його досліджень у наукових роботах і сьогодні, наприклад, у дисертаційній роботі на здобуття ступеня д. т. н. І. В. Клименко (частково положення дисертації наведені в роботі [4]) та інших роботах вітчизняних і закордонних учених. Так, у роботах [17, 18, 24] розглянуто вплив позовжніх сил на стійкість вантажних вагонів, у роботах [19, 25] – моделювання стійкості колісної пари, в роботах [5, 21] надані рекомендації щодо розрахунку горизонтальних сил, у роботах [13, 22, 23] проаналізовані динамічні показники вагона залежно від умов експлуатації.

Основу наявного методу розрахунку коефіцієнта стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки складає розрахункова схема сил взаємодії між колесом і рейкою в точці контакту, рис. 1.

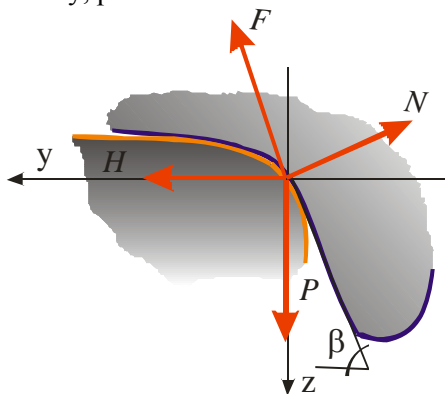


Рис. 1. Розрахункова схема сил взаємодії між колесом і рейкою в точці контакту

Fig. 1. Calculation scheme of the interaction forces between the wheel and the rail at the contact point

Взаємозв'язок між силами можна визначити через рівняння квазістатичної рівноваги їх проєкцій на вертикальну й горизонтальну осі:

$$\begin{cases} H - N \sin \beta + \mu N \cos \beta = 0 \\ P - N \cos \beta - \mu N \sin \beta = 0 \end{cases}, \quad (1)$$

де P – вертикальне навантаження колеса на рейку; H – горизонтальна сила тиску від колеса на рейку; N – реакція рейки; μ – коефіцієнт тертя колеса по рейці; F – сила тертя, що протидіє зісковзуванню колеса, $F = \mu N$; β – кут нахилу гребеня колеса.

У «Методичних вказівках щодо порядку службового розслідування причин сходжень рухомого складу з рейок на залізницях України» ЦРБ–0036 зазначено, що «у всіх випадках для визначення причин сходження рухомого складу з рейок у кривій ділянці колії необхідно...» серед іншого «визначити коефіцієнт стійкості вкочування гребеня колеса на головку зовнішньої рейки» [8]. Для цього використовують наведену розрахункову формулу, яка враховує відношення вертикальних і горизонтальних сил, що діють від колеса на рейку. На жаль, відсутність у [8] пояснень щодо визначення цих сил унеможливило її безпосереднє застосування на інженерному рівні.

Мета

Основною метою цієї роботи є створення методики практичного інженерного розрахунку коефіцієнта стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки. Викладена методика буде мати вичерпну інформацію як із розрахункових формул, так і з довідкових матеріалів, для виключення необхідності залучення додаткових джерел та спеціального програмного забезпечення.

Методика

Основною задачею реалізації поставленої мети є винесення на інженерний рівень розрахунку горизонтальних сил. Унаслідок складності процесу взаємодії колії та рухомого складу й необхідності врахування великої кількості факторів, що мають вплив на результат, як правило, для визначення горизонтальних сил застосовують складні динамічні моделі. Можливий розв'язок полягає у використанні рекомендацій, наведених у роботах [1, 11]. У них доведено, що для конкретного типу рухомого складу горизонтальна сила може бути розрахо-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

вана за лінійною залежністю від значення непогашеного прискорення ($\alpha_{\text{нп}}$):

$$H = f(a, b, \alpha_{\text{нп}}). \quad (2)$$

Коефіцієнти a і b попередньо визначають апроксимацією результатів моделювання руху в кривій залежно від типу рухомого складу та умов експлуатації і подають як довідкові дані. Таблиці з такими коефіцієнтами наведені в ЦП–0117 [11] та, у більш розширеному вигляді, – у роботі [1].

Слід звернути увагу, що в роботі [11] сили визначають у кг, тому для подальшого використання сил у кН їх необхідно рахувати за формулою:

$$H = (a + b\alpha_{\text{нп}})0,001g, \quad (3)$$

де g – прискорення вільного падіння, $g = 9,81 \text{ м/с}^2$.

Автори цієї роботи додатково визначили коефіцієнти для деяких типів рухомого складу, які відсутні у вказаних джерелах. Це стосується маневрових тепловозів і різних варіантів осьового навантаження для вантажних вагонів.

Для вантажних вагонів рівень завантаження впливає не тільки на вертикальні сили, а й на горизонтальні. Це пояснює необхідність визначення різних коефіцієнтів для залежності (2) відповідно до осьового навантаження.

Для цього була використана аналітична методика розрахунку горизонтальних сил [1, 6, 15]. Відповідно до неї варіюється положення центра обертання візка, яке задають як відстань від осі першої колісної пари (X). Кожному варіанту такого положення відповідають певні значення горизонтальних сил взаємодії колесо – рейка (направляюча (Y), бокова (H), а в разі необхідності й рамна, як показник взаємодії колісна пара – рейка) і відцентрової сили (F_c):

$$\{Y, H, F_c\} = f(X). \quad (4)$$

Результати таких розрахунків для різних рівнів завантаження вантажного вагона наприкладі пари сил направляюча – відцентрова показано на рис. 2. Для цих і подальших розрахунків коефіцієнт тертя колеса по рейці був узятий

$\mu = 0.25$. У легенді рисунка в дужках вказано відповідне значення осьового навантаження в т/вісь.

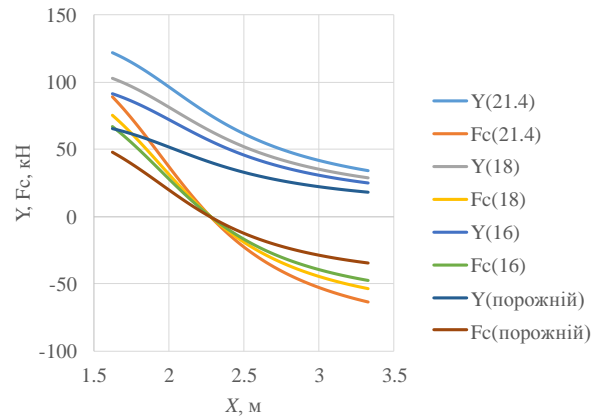


Рис. 2. Направляюча (Y) й відцентрова (F_c) сили залежно від відстані (X) центра обертання візка до першої осі для вантажного вагона

Fig. 2. Direction (Y) and centrifugal (F_c) forces depending on the distance (X) of the bogie rotation center to the first axis for the freight car

Ураховуючи, що відцентрова сила у свою чергу є функцією від непогашеного прискорення $F = f(\alpha_{\text{нп}})$, через зв'язок (4) можна отримати горизонтальні сили вже залежно від непогашеного прискорення. На рис. 3 показано розрахунки й подальшу апроксимацію таких залежностей для вантажного вагона.

Коефіцієнти визначено апроксимацією результатів для діапазону непогашеного прискорення від $-0,3$ до $0,7 \text{ м/с}^2$. Ураховуючи, що функція (2) зберігає майже лінійний вигляд у значно більших межах, застосування отриманих даних не обмежується вказаним діапазоном.

У деяких випадках слід брати до уваги, що зазначена методика оцінки стійкості колеса на рейці базується на співвідношеннях вертикальних і горизонтальних сил без урахування поздовжніх. У випадку порожніх або мала навантажених вагонів уже дія саме поздовжніх сил може бути причиною сходження [17, 18, 24].

Аналогічні розрахунки були виконані для деяких типів маневрових локомотивів. Результати наведені на рис. 4 і 5.

Отримані коефіцієнти для розрахунку горизонтальної сили в залежності від непогашеного прискорення наведені в табл. 1.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

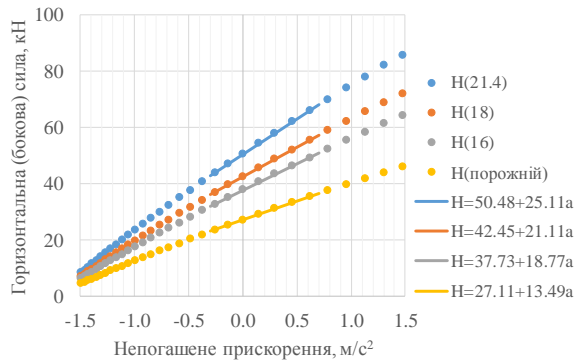


Рис. 3. Розрахунки та апроксимації горизонтальної сили для вантажного вагона

Fig. 3. Calculations and approximations of horizontal force for a freight car

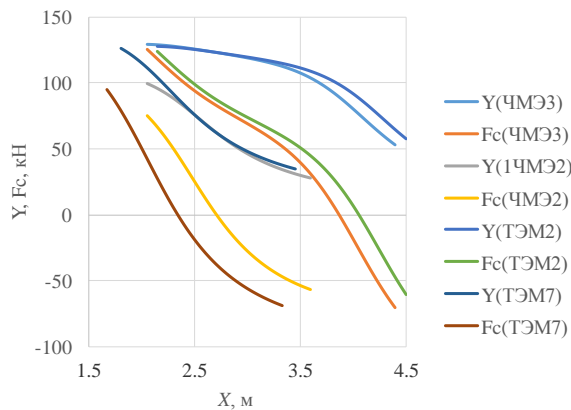


Рис. 4. Направляюча (Y) й відцентрова (F_c) сили залежно від відстані (X) центра обертання візка до першої осі для маневрових локомотивів

Fig. 4. Direction (Y) and centrifugal (F_c) forces depending on the distance (X) of the bogie rotation center to the first axis for the shunting locomotive

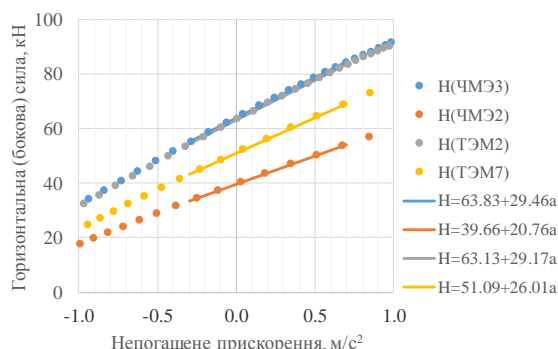


Рис. 5. Розрахунки та апроксимації горизонтальної сили для маневрових локомотивів

Fig. 5. Calculations and approximations of horizontal force for shunting locomotives

Результати

Унаслідок зазначеного запропонована методика інженерного розрахунку коефіцієнта стійкості проти вкочування колеса на рейки як послідовність, поділена на декілька кроків. Кожен крок включає необхідні пояснення, розрахункові формули з переліком числових значень змінних величин та відповідні посилання на чинні нормативні документи.

1. Визначити значення радіуса R (м) і підвищення зовнішньої рейки h (мм) за колієвимірною стрічкою або ручним вимірюванням. У разі ручного вимірювання методом стрілкою 20 м радіус визначають за формулою:

$$R = \frac{50000}{f_p}, \quad (5)$$

де f_p – стріла, мм.

Цей пункт відповідає ф. (11.3) ЦРБ–0036 [8], ф. (3) ЦП–0267 [14], ф. (3.1) ЦП–0236 [10], ф. (2.2) ЦП–0269 [3].

2. Розрахувати значення непогашеного прискорення $\alpha_{\text{нп}}$ (м/с²)

$$\alpha_{\text{нп}} = \frac{V^2}{3,6^2 R} - 0,00613h; \quad (6)$$

де V – швидкість руху, км/год.

Цей пункт відповідає ф. (11.8) ЦРБ–0036 [8], ф. (4.2) ЦП–0236 [10], ЦП–0269 [3].

3. Розрахувати значення горизонтальної (H) і вертикальної (P) сил (кН)

$$H = a + b\alpha_{\text{нп}}. \quad (7)$$

Значення вертикальної сили й коефіцієнтів a і b наведені в табл. 1.

Для інших типів рухомого складу їх значення можна взяти з джерел [1, 11].

Цей пункт відповідає ЦП–0117 [11].

4. Розрахувати коефіцієнт стійкості вкочування гребеня колеса на головку рейки:

$$\varepsilon = \frac{\text{tg}\beta - \mu}{1 + \mu \cdot \text{tg}\beta} \cdot \frac{P}{H}, \quad (8)$$

де β – кут нахилу бандажа колеса, які визначають за результатами натурних вимірювань. За їх відсутності можна взяти для локомотивів $\beta = 70^\circ$ ($\text{tg}70^\circ = 2,747$), для вагонів $\beta = 60^\circ$

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

($\text{tg}60^\circ = 1,732$). Коефіцієнт тертя колеса по рейці в більшості випадків беруть $\mu = 0,25$.

Цей пункт відповідає ф. (8.3) ЦРБ–0036 [8].

Формула (8) отримана з розв'язання системи рівнянь (1).

Таблиця 1

Вертикальна сила й коефіцієнти для визначення горизонтальної (бокової) сили

Table 1

Vertical force and coefficients for determining the horizontal (lateral) force

Тип рухомого складу	Вертикальне навантаження від колеса на рейку (P), кН	Коефіцієнти для визначення горизонтальної сили	
		a	b
Пасажирський вагон на візках КВЗ–ЦНІІ	71,25	30,55	15,99
Вантажний чотирьохвісний вагон на візках ЦНІІ–ХЗ–О	105,0 (21,4 т/вісь)	50,48	25,11
	88,3 (18 т/вісь)	42,45	21,11
	78,5 (16 т/вісь)	37,73	18,77
	56,4 (порожній)	27,11	13,49
ТЕМ2	100	63,13	29,17
ТЕМ7	112,5	51,09	26,01
ЧМЕ2	92,5	39,66	20,76
ЧМЕ3	102,5	63,83	29,46

5. *Перевірити умову, що коефіцієнт стійкості вкочування гребеня колеса на головку рейки більший за мінімальне значення. З урахуванням запасу стійкості, мінімально допустиме значення встановлюється більше 1 і, відповідно до [6] та ЦП–0235 [9], складає: для локомотивів – 1,4; для вантажних вагонів – 1,3; для пасажирських вагонів – 1,6.*

Практичний приклад. На основі наведеної методики розглянемо приклад визначення коефіцієнта стійкості проти вкочування колеса на рейки для вантажного вагона на візках ЦНІІ–ХЗ–О із середнім завантаженням 18 т/вісь, що рухається по заданій ділянці зі швидкістю 40 км/год.

1. На ділянці зроблено зйомку плану методом стріл та підвищення зовнішньої рейки. Результати зйомки наведено на рис. 6.

2. Непогашені прискорення в кожній точці кривої визначені за формулою (6) і наведені на рис. 7.

3. Відповідно до табл. 1 вертикальне навантаження від колеса на рейку складатиме 88,3 кН. За формулою (7) і табл. 1. розраховуємо значення горизонтальної сили. Результати розрахунків наведено на рис. 8.

4. За формулою (8) у кожній точці кривої визначаємо коефіцієнт стійкості вкочування гребеня колеса на головку рейки. Узято кут нахилу бандажа колеса $\beta = 60^\circ$, коефіцієнт тертя колеса по рейці $\mu = 0,25$. Результати розрахунків наведено на рис. 9.

5. Відповідно до рис. 9, найменше отримане значення коефіцієнта стійкості 1,932, що не менше мінімально допустимого значення, яке для вантажних вагонів складає 1,3 [6, 9].

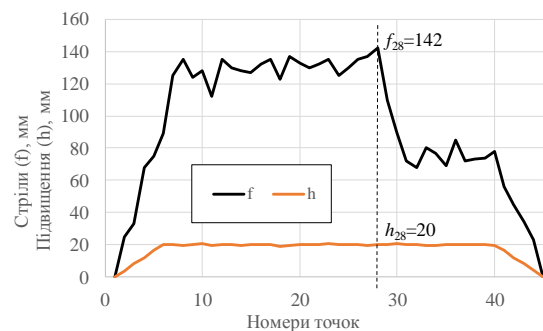


Рис. 6. Графік стріл та підвищень на ділянці

Fig. 6. Graph of versines and elevations at the site

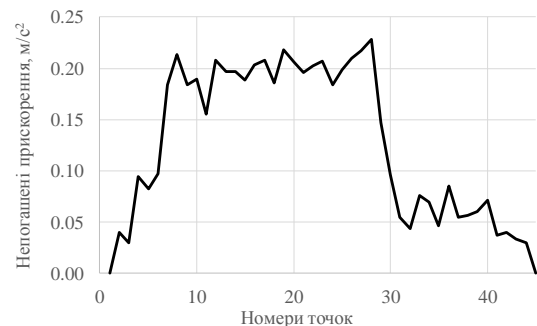


Рис. 7. Результати розрахунку непогашених прискорень

Fig. 7. The results of calculation of unbalanced accelerations

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

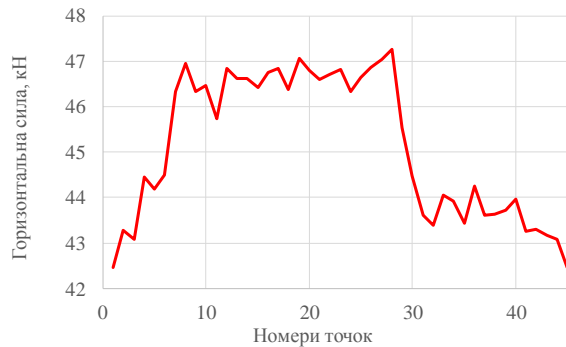


Рис. 8. Результати розрахунку горизонтальної сили

Fig. 8. The results of calculation of horizontal force

Таким чином, на всій розглянутій ділянці забезпечується запас стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки.

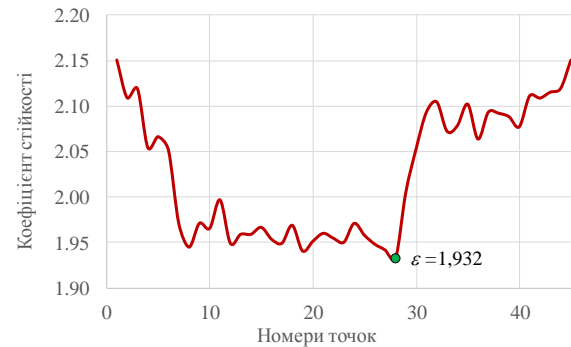


Рис. 9. Результати розрахунку коефіцієнта стійкості вкочування гребеня колеса на головку рейки

Fig. 9. The results of calculating the stability coefficient of wheel flange climbing on the rail head

Для точки з мінімальним значенням коефіцієнта стійкості (точка № 28 за рис. 6) розрахунки основних величин показані в табл. 2.

Таблиця 2

Числовий приклад розрахунку коефіцієнта стійкості

Table 2

Numerical example of calculating the stability coefficient

Величина	Посилання	Розрахунок
Стріла	Натурні виміри	142 мм
Підвищення		20 мм
Радіус	ф. (5)	$R = \frac{50000}{142} = 352 \text{ м}$
Непогашене прискорення	ф. (6)	$\alpha_{\text{нп}} = \frac{40^2}{3,6^2 \cdot 352} - 0,00613 \cdot 20 = 0,228 \text{ м/с}^2$
Горизонтальна сила	ф. (7), табл. 1	$H = 42,45 + 21,11 \cdot 0,228 = 47,263 \text{ кН}$
Вертикальна сила	табл. 1	$P = 88,3 \text{ кН}$
Коефіцієнт стійкості	ф. (8)	$\varepsilon = \frac{1,732 - 0,25}{1 + 0,25 \cdot 1,732} \cdot \frac{88,3}{47,263} = 0,932$

Наукова новизна та практична значимість

У роботі набули подальшого розвитку науково-практичні підходи щодо аналізу взаємодії колії й рухомого складу в горизонтальній площині.

Автори визначили відсутні коефіцієнти розрахунку горизонтальної сили залежно від непо-

гашеного прискорення для деяких типів маневрових локомотивів та для вантажного вагона з урахуванням рівня його завантаження.

Запропонована покрокова методика розрахунку коефіцієнта стійкості дає можливість на інженерному рівні проводити практичний аналіз забезпечення запасу стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки, що необхідно під час розслідування причин схо-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

дження рухомого складу з рейок та для низки інших задач, пов'язаних із рухом у кривих ділянках колії.

Висновки

Однією з причин сходження рухомого складу з рейок може бути незабезпечення запасу стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки. Розрахунковий аналіз цього показника вимагав застосування складних математичних інструментів, що унеможливило його виконання на інженерному рівні. Запропонована покрокова методика розв'язує це питання.

Мінімальне значення коефіцієнта стійкості,

установлене в нормативних документах, включає певний запас стійкості, пов'язаний, у тому числі, з деякими пропущеннями, що мають місце в методі розрахунків. Якщо в результаті аналізу отримане значення коефіцієнта більше за мінімально допустиме, то це дає обґрунтування для висновку щодо забезпечення надійності запасу стійкості проти вкочування гребеня колеса на рейку. Результат, за якого визначений коефіцієнт менший від нормативного, не надає можливості зробити остаточний висновок щодо причин сходження, але вказує на необхідність додаткового аналізу за цим показником із застосуванням більш спеціалізованих математичних інструментів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Даніленко Е. І. *Залізнична колія* : підруч. для вищ. навч. закл. Київ : Інпрес, 2010. Т. 2. 456 с.
2. Ершков О. П. *Расчеты поперечных горизонтальных сил в кривых* : сб. тр. ВНИИЖТа. Москва : Транспорт, 1966. № 301. 235 с.
3. *Інструкція з улаштування та утримання колії залізниць України* : ЦП-0269. [Чинний від 2012-03-01]. Київ, 2012. 456 с.
4. Коротенко М. Л., Клименко И. В., Панасенко В. Я. *Безопасность от схода колеса с рельсов и совершенствование конструкций подвижного состава* : монографія. Днепропетровск, 2013. 220 с.
5. Кузишин А. Я., Батіг А. В. Використання додаткового критерію оцінювання безпеки руху від сходу колеса з рейки в судовій залізнично-транспортній експертизі. *Теорія та практика судової експертизи і криміналістики*. 2018. № 18. С. 454–460. DOI: <https://doi.org/10.32353/khrife.2018.51>
6. Курган Д. М., Губар О. В. Оцінка безпеки руху за умови забезпечення стійкості проти вкочування гребеня колеса на головку рейки. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2016. № 11. С. 65–72. DOI: <https://doi.org/10.15802/ecsr2016/91516>
7. Курган М. Б., Байдак С. Ю., Лужицький С. Ю. Умови підвищення безпеки руху поїздів в кривих ділянках залізничної колії. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2014. № 8. С. 41–49. DOI: <https://doi.org/10.15802/ecsr2014/57181>
8. *Методичні вказівки щодо порядку службового розслідування причин сходжень рухомого складу з рейок на залізницях України* : ЦРБ-0036. [Чинний від 2012-06-21]. Київ : НВП Поліграфсервіс, 2012. 251 с.
9. *Норми допустимих швидкостей руху рухомого складу по залізничних коліях державної адміністрації залізничного транспорту України шириною 1520 мм* : ЦП-0235. [Чинний від 2010-12-14]. Київ : НВП Поліграфсервіс, 2012. 72 с.
10. *Правила визначення підвищення зовнішньої рейки і встановлення допустимих швидкостей в кривих ділянках колії* : ЦП-0236. [Чинний від 2010-12-14]. Київ, 2011. 52 с.
11. *Правила розрахунків залізничної колії на міцність і стійкість* : ЦП-0117. [Чинний від 2004-12-13]. Київ : Транспорт України, 2004. 64 с.
12. Сокол Э. Н. *Железнодорожно-транспортное происшествие и его механизм (Судебная экспертиза. Элементы теории и практики)* : монографія. Львів : ПАІС, 2011. 376 с.
13. Татарінова В. А., Недужа Л. О. Теоретичні дослідження руху одиниці рухомого складу. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2018. № 16. С. 121–126. DOI: <https://doi.org/10.15802/ecsr2018/172691>
14. *Технічні вказівки щодо оцінки стану рейкової колії за показниками колісвимірвальних вагонів та забезпечення безпеки руху поїздів при відступах від норм утримання рейкової колії* : ЦП-0267. [Чинний від 1996-01-17]. Київ, 2012. 25 с.
15. Чернышов М. А. *Практические методы расчета пути*. Москва : Транспорт, 1967. 236 с.

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

16. Шахунянц Г. М. *Железнодорожный путь* : учебник для вузов ж.-д. трансп. Москва : Транспорт, 1987. 479 с.
17. Швець А. О. Динаміка піввагонів від дії поздовжніх сил. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. № 6 (84). С. 142–155. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/195821>
18. Швець А. О. Стійкість вантажних вагонів у разі дії стискних поздовжніх сил. *Наука та прогрес транспорту*. 2020. № 1 (85). С. 119–137. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/199485>
19. Agh C. Vasúti kerékpár futási instabilitása a pályadiagnosztika szemszögéből. *Sínek világa*. 2017. Vol. 6. P. 17–20.
20. Fischer S. Comparison of railway track transition curves. *Pollack Periodica*. 2009. Vol. 4. Iss 3. P. 99–110. DOI: <https://doi.org/10.1556/pollack.4.2009.3.9>
21. Kovalchuk V., Kuzyshyn A., Kostritsa S., Sobolevska Yu., Batig A., Dovganiuk S. Improving a methodology of theoretical determination of the frame and directing forces in modern diesel trains. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2018. Vol. 6/7 (96). P. 19–25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.149838>
22. Rezvani M. A., Mazraeh A. Dynamics and stability analysis of a freight wagon subjective to the railway track and wheelset operational conditions. *European Journal of Mechanics - A/Solids*. 2017. Vol. 61. P. 22–34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2016.08.011>
23. Shatunov O. V., Shvets A. O., Kirilchuk O. A., Shvets A. O. Research of wheel-rail wear due to non-symmetrical loading of a flat car. *Science and Transport Progress*. 2019. № 4 (82) P. 102–117. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/177457>
24. Shvets A., Zheliezov K., Akulov A., Zabolotnyi O., Chabaniuk Ye. Determination of the issue concerning the lift resistance factor of lightweight car. *Science and Transport Progress*. 2015. №. 6 (60). P. 134–148. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/57098>
25. Xu L., Zhai W., Chen Z. On use of characteristic wavelengths of track irregularities to predict track portions with deteriorated wheel/rail forces. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2018. Vol. 104. P. 264–278. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2017.10.038>

Д. Н. КУРГАН^{1*}, А. В. ГУБАРЬ², М. А. ГАВРИЛОВ³

^{1*}Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел +38 (056) 373 15 42, эл. почта kurhan.d@gmail.com, ORCID 0000-0002-9448-5269

²Каф. «Путь и путевое хозяйство», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел +38 (056) 373 15 42, эл. почта neris@ua.fm, ORCID 0000-0001-8683-5372

³Каф. «Проектирование и строительство дорог», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 48, эл. почта maxgavrilla@gmail.com, ORCID 0000-0002-1321-170X

МЕТОДИКА ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА УСТОЙЧИВОСТИ ПРОТИВ ВКАТЫВАНИЯ КОЛЕСА НА РЕЛЬС

Цель. Одним из показателей взаимодействия пути и подвижного состава, несоблюдение которого может привести к нарушению безопасности движения, а именно к схождению, является условие обеспечения устойчивости против вкатывания гребня колеса на головку рельса. Целью данной работы является создание методики практического инженерного расчета коэффициента стойкости против вкатывания гребня колеса на головку рельса. Изложенная методика будет иметь полную информацию как из расчетных формул, так и из справочных материалов, для исключения необходимости привлечения дополнительных источников и специального программного обеспечения. **Методика.** Основной задачей реализации поставленной цели является вынесение на инженерный уровень расчета горизонтальных сил. Вследствие сложности процесса взаимодействия пути и подвижного состава и необходимости учета большого количества факторов, которые имеют влияние на результат, как правило, для определения горизонтальных сил применяют сложные динамические модели. Возможное решение заключается в предположении, что для конкретного типа подвижного состава горизонтальная сила может быть рассчитана по линейной зависимости от значения непогашенного ускорения. Для этого была использована аналитическая методика расчета горизонтальных сил. **Результаты.** Авто-

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

ры определили отсутствующие коэффициенты для расчета горизонтальной силы в зависимости от непогашенного ускорения для некоторых типов маневровых локомотивов и для грузового вагона с учетом уровня его загрузки. **Научная новизна.** В работе приобрели дальнейшее развитие научно-практические подходы для анализа взаимодействия пути и подвижного состава в горизонтальной плоскости. **Практическая значимость.** Предложенная пошаговая методика расчета коэффициента устойчивости дает возможность на инженерном уровне выполнять практический анализ обеспечения запаса устойчивости против вкатывания гребня колеса на головку рельса, который необходим при расследовании причин сходження подвижного состава с рельсов и для ряда других задач, связанных с движением в кривых участках пути.

Ключевые слова: железнодорожный путь; кривая; горизонтальная сила; боковая сила; коэффициент устойчивости; вкатывание колеса на рельс; непогашенное ускорение; взаимодействие пути и подвижного состава; безопасность движения

D. M. KURHAN^{1*}, O. V. HUBAR², M. O. HAVRILOV³

^{1*}Dep. «Track and Track Facilities», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 42, e-mail kurhan.d@gmail.com, ORCID 0000-0002-9448-5269

²Dep. «Track and Track Facilities», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 42, e-mail neris@ua.fm, ORCID 0000-0001-8683-5372

³Dep. «Roads Design and Construction», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 48, e-mail maxgavrilla@gmail.com, ORCID 0000-0002-1321-170X

METHODOLOGY FOR ENGINEERING CALCULATION OF STABILITY COEFFICIENT AGAINST WHEEL CLIMBING ON THE RAIL

Purpose. One of the indicators of the track and rolling stock interaction, non-observance of which can result in a traffic safety violation, namely to derailment, is a condition for ensuring stability against the wheel flange climbing onto the rail head. The aim of this work is to create a methodology for practical engineering calculation of the resistance coefficient against the wheel flange climbing onto the rail head. The described methodology will have complete information both from calculation formulas and from reference materials, to eliminate the need to attract additional sources and special software. **Methodology.** The main objective of the implementation of this purpose is to bring the calculation of horizontal forces to the engineering level. Due to the complexity of the interaction process between the track and the rolling stock and the need to take into account a large number of factors that have an effect on the result, as a rule, complex dynamic models are used to determine horizontal forces. A possible solution lies in the assumption that for a specific type of rolling stock, the horizontal force can be calculated by linear dependence on the value of the unbalanced acceleration. For this, an analytical technique for calculating horizontal forces was used. **Findings.** The authors determined the missing coefficients for calculating the horizontal force depending on the unbalanced acceleration for some types of shunting locomotives and for a freight car taking into account its load level. **Originality.** In the work, scientific and practical approaches for the interaction analysis of the track and rolling stock in the horizontal plane acquired further development. **Practical value.** The proposed step-by-step methodology for calculating the stability coefficient makes it possible at the engineering level to carry out a practical analysis of ensuring the safety margin against the wheel flange climbing onto the rail head, which is necessary when investigating the causes of rolling stock derailment and for a number of other tasks related to movement in curved track sections.

Keywords: railway track; curve; horizontal force; lateral force; stability coefficient; wheel climbing onto the rail; unbalanced acceleration; track and rolling stock interaction; traffic safety

REFERENCES

1. Danilenko, E. I. (2010). *Zaliznychna koliia: pidruchnyk dlia vyshchykh navchalnykh zakladiv*. (Vol. 2). Kyiv: Inpres. (in Ukrainian)
2. Ershkov, O. P. (1966). *Raschety poperechnykh ghorizontalnykh syl v kryvykh*. *Sbornik trudov VNIIZhT. Moscow: Transport, 301*. (in Russian)
3. *Instrukcija z ulashtuvannja ta utrymannja koliji zaliznycj Ukrainy, 456 TsP-0269* (2012). (in Ukrainian)

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

4. Korotenko, M. L., Klimentenko, I. V., & Panasenko, V. Ja. (2013). *Bezopasnostj ot skhoda koleasa s reljsov y sovershenstvovanye konstrukcyj podvyzhnogho sostava*. Dnepropetrovsk. (in Russian)
5. Kuzishyn, A. Y., & Batig, A. V. (2018). Use of additional assessment criterion for traffic safety against railway wheel derailment for forensic railway transport examination. *Theory and Practice of Forensic Science and Criminalistics*, 18, 454-461. DOI: <https://doi.org/10.32353/khrife.2018.51> (in Ukrainian)
6. Kurhan, D. M., & Gubar, O. V. (2016). Assessment of Safety While Ensuring Stability to Mounting of a Wheel Flange on a Rail. *Electromagnetic compatibility and safety on railway transport*, 11, 65-72. DOI: <https://doi.org/10.15802/ecsrt2016/91516> (in Ukrainian)
7. Kurhan, M. B., Bajdak, S. Ju., & Luzhycykij, S. Ju. (2014). Umovy pidvyshchennia bezpeky rukhu poizdiv v kryvykh diliankakh zaliznychnoi kolii. *Electromagnetic compatibility and safety on railway transport*, 8, 41-49. DOI: <https://doi.org/10.15802/ecsrt2014/57181> (in Ukrainian)
8. *Metodychni vkazivky shhodo porjadku sluzhbovogho rozsliduvannja prychnyn skhodzhenj rukhomogho skladu z rejok na zaliznycjakh Ukrajiny*, 251 TsRB-0036 (2012). (in Ukrainian)
9. *Normy dopustymykh shvydkostej rukhu rukhomogho skladu po zaliznychnykh kolijakh derzhavnoji administraciji zaliznychnogho transportu Ukrajiny shyrynoju 1520 mm*, 72 TsP-0235 (2012). (in Ukrainian)
10. *Pravyla vyznachennja pidvyshchennja zovnishnjoji rejky i vstanovlennja dopustymykh shvydkostej v kryvykh diljankakh koliji*, 52 TsP-0236 (2011). (in Ukrainian)
11. *Pravyla rozrakhunkiv zaliznychnoji koliji na micnistj i stijkistj*, 64 TsP-0117 (2004). (in Ukrainian)
12. Sokol, E. N. (2011). *Zheleznodorozhno-transportnoe proisshestvie i ego mekhanizm (Sudebnaya ekspertiza. Elementy teorii i praktiki)*: monografiya. Lviv: PAIS. (in Russian)
13. Tatarinova, V. A., & Neduzha, L. O. (2018). Theoretical Research of the Traction Vehicle Motion. *Electromagnetic compatibility and safety on railway transport*, 16, 121-126. DOI: <https://doi.org/10.15802/ecsrt2018/172691> (in Russian)
14. *Tekhnichni vkazivky shhodo ocinky stanu rejkovoji koliji za pokaznykamy kolijevymirjuvaljnykh va-ghoniv ta zabezpechennja bezpeky rukhu poizdiv pry vidstupakh vid norm utrymannja rejkovoji koliji*, 25 TsP-0267 (2012). (in Ukrainian)
15. Chernyshov, M. A. (1967). *Praktycheskye metody rascheta puty*. Moscow: Transport. (in Russian)
16. Shakhunyan, G. M. (1987). *Zheleznodorozhnyj putj: uchebnyk dlja vuzov*. Moscow: Transport. (in Russian)
17. Shvets, A. O. (2019). Gondola cars dynamics from the action of longitudinal forces. *Science and Transport Progress*, 6(84), 142-155. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/195821> (in Ukrainian)
18. Shvets, A. O. (2020). Stability of freight cars under the action of compressive longitudinal forces. *Science and Transport Progress*, 1(85), 119-137. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/199485> (in Ukrainian)
19. Ágh, C. (2017). Vasúti kerékpár futási instabilitása a pályadiagnosztika szemszögéből. *Sinek világa*, 6, 17-20. (in Hungarian)
20. Fischer, S. (2009). Comparison of railway track transition curves. *Pollack Periodica*, 4(3), 99-110. DOI: <https://doi.org/10.1556/pollack.4.2009.3.9> (in English)
21. Kovalchuk, V., Kuzyshyn, A., Kostritsa, S., Sobolevska, Yu., Batig, A., & Dovganiuk, S. (2018). Improving a methodology of theoretical determination of the frame and directing forces in modern diesel trains. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*, 6/7(96), 19-25. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2018.149838> (in English)
22. Rezvani, M. A., & Mazraeh, A. (2017). Dynamics and stability analysis of a freight wagon subjective to the railway track and wheelset operational conditions. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 61, 22-34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.euromechsol.2016.08.011> (in English)
23. Shatunov, O. V., Shvets, A. O., Kirilchuk, O. A., & Shvets, A. O. (2019). Research of wheel-rail wear due to non-symmetrical loading of a flat car. *Science and Transport Progress*, 4(82), 102-117. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/177457> (in English)
24. Shvets, A., Zheliezov, K., Akulov, A., Zabolotnyi, O., & Chabaniuk, Ye. (2015). Determination of the issue concerning the lift resistance factor of lightweight car. *Science and Transport Progress*, 6(60), 134-148. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2015/57098> (in English)
25. Xu, L., Zhai, W., & Chen, Z. (2018). On use of characteristic wavelengths of track irregularities to predict track portions with deteriorated wheel/rail forces. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 104, 264-278. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2017.10.038> (in English)

Надійшла до редколегії: 27.01.2020

Прийнята до друку: 29.05.2020

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

УДК 004.7:004.032.26

В. М. ПАХОМОВА^{1*}, М. С. КОННОВ^{2*}

^{1*}Каф. «Електронні обчислювальні машини», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, ел. пошта viknikpakh@gmail.com, ORCID 0000-0002-0022-099X

^{2*}Каф. «Електронні обчислювальні машини», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, ел. пошта mkonnov1997@gmail.com, ORCID 0000-0001-7212-7631

ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОХ ПІДХОДІВ ДО ВИЯВЛЕННЯ МЕРЕЖНИХ АТАК ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ НЕЙРОМЕРЕЖНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ

Мета. На сучасному етапі найчастіше пропонують системи виявлення мережних атак, що побудовані на основі таких нейронних мереж: багатошарового перцептрона, мережі Кохонена або самоорганізованої карти та їх комбінацій. У статті передбачено дослідити ефективність двох підходів до виявлення атак на комп'ютерну мережу з використанням нейромережної технології на основі нормалізованих даних відкритої бази NSL–KDD. **Методика.** Як архітектурні рішення системи виявлення мережних атак запропоновано розглянути такі підходи: на основі однієї нейронної мережі, що визначає клас атаки (перший підхід), та ансамблю із п'яти нейронних мереж (другий підхід), який на першому етапі визначає категорію атаки (DoS, Probe, U2R, R2L), а на другому етапі – клас атаки, що належить до певної категорії. **Результати.** На створених у програмі MatLAB нейронних мережах проведено дослідження їх похибки від довжини навчальної вибірки за різними алгоритмами навчання: Levenberg–Marquardt; Bayesian Regularization; Scaled Conjugate Gradient – за різної кількості прихованих нейронів (мінімальної, середньої та максимальної). Визначено оптимальні параметри нейронних мереж за двома підходами. **Наукова новизна.** У ході проведення експериментів за різними підходами отримано результати: TP (True Positive); FP (False Positive); FN (False Negative); TN (True Negative). На їх основі розраховано такі показники оцінки якості рішень: коректність визначення мережних атак; помилкові спрацювання; достовірність; точність та повнота, що доказують доцільність використання ансамблю нейронних мереж (другого підходу). **Практична значимість.** На створених нейронних мережах за двома підходами проведено дослідження: часу роботи нейронних мереж; помилки першого роду; помилки другого роду. За результатами першого дослідження в середньому час роботи ансамблю нейронних мереж складає 0,92 с, а час роботи нейронної мережі (за першим підходом) дорівнює 2,21 с. За результатами другого дослідження помилка першого роду з використанням ансамблю нейронних мереж складає 2,17 %, а за першим підходом – 7,39 %. За результатами третього дослідження помилка другого роду з використанням ансамблю нейронних мереж складає 3,91 %, а за першим підходом – 6,96 %, що підтверджує ефективність використання ансамблю нейронних мереж (другого підходу).

Ключові слова: атака; ансамбль; нейронна мережа; помилка першого роду; помилка другого роду; достовірність; точність; повнота

Вступ

Створення ефективної системи виявлення мережних атак вимагає застосування якісно нових підходів до обробки інформації, які повинні ґрунтуватися на адаптивних алгоритмах, здатних до самонавчання. Найбільш перспективним напрямом у створенні подібних систем виявлення атак на комп'ютерну мережу є застосування нейромережної технології.

На сучасному етапі найчастіше пропонують системи виявлення мережних атак, що побудовані на основі таких нейронних мереж (НМ): багатощарового перцептрона [1, 2, 14, 15], мережі Кохонена або самоорганізованої карти [8, 9, 11, 12] та їх комбінацій [3–5, 7].

Багатощаровий перцептрон (Multi Layer Perceptron, MLP). Так, наприклад, А. В. Крижановський за допомогою програми Statistic Neural Networks створив НМ, що допускає середню квадратичну помилку під час виявлення атаки 0,006826 % [1]. А. Г. Мустафаєв за допомогою нейропакета Neural Network Toolbox програми MatLAB створив НМ, що в 93 % випадків правильно класифікує атаки [2]. І. В. Жуковицький і В. М. Пахомова за допомогою програми Fann Explorer створили НМ конфігурації 19–1–25–5 (19 – кількість початкових нейронів; 1 – кількість прихованих шарів; 25 – кількість прихованих нейронів; 5 – кількість результуючих нейронів), що дозволить у реальному часі виявити загрози Back, Buffer_overflow, Quess_password, Ipsweep, Neptune на комп'ютерну мережу [15].

Самоорганізована карта (Self Organizing Maps, SOM). Gunes Kayachik, Nur Zincir–Hejvud і Malkolm Hejvud [8] під час використання бази даних KDD99 з'ясували, що система виявляє атаки U2R і R2L в 90,4 % випадків, але при цьому помилкове виявлення атаки складає 1,38 %. Palomo та Esteban [12] провели дослідження на основі зростаючої ієрархічної самоорганізованої карти із застосуванням бази KDD99. У результаті визначено майже максимальний рівень виявлення атаки, що складає 99,99 %, але при цьому є суттєвий недолік, який полягає у великій імовірності помилки у 5,44 % порівняно з іншими НМ. Ortis Andres [11] також проводила дослідження із застосуванням зростаючої ієрархічної самоорганізованої карти. У результаті була

створена НМ із підвищенням швидкості виявлення атак, яка для навчання використовувала метод маркування ймовірностей. Для цієї НМ використано базу NSL–KDD. Досягнуто найвищу частоту виявлення атак 99,68 % із найменшим помилковим спрацьовуванням 0,02 %. Отже, краща загальна продуктивність, але рівень виявлення U2R–атак найгірший серед усіх інших атак. Згідно з [9], наявні системи виявлення вторгнень на основі самоорганізованих карт мають труднощі, які пов'язані з тривалим часом обчислень і низькою частотою виявлення атак U2R і R2L. Щоб подолати ці труднощі, кафедра обчислювальної техніки інституту інженерних технологій у запропонованій моделі використаний підхід зі зростаючою ієрархічною самоорганізованою картою з метою збільшення часу обчислень і відповідних функцій для атак U2R і R2L та підвищення продуктивності. У результаті на такій моделі приблизно на 75 % збільшується частота виявлення атак U2R і R2L порівняно з самоорганізованими картами.

Комбінований підхід. Для виявлення DDoS–атак у роботі [3] застосовано SOM і MLP. За допомогою самоорганізованої карти відбувається кластеризація 50-символьних подій у вузлі матриці, у яких згруповані події аналогічних числових символів. Фактично окремі вузли будуть являти собою певні сценарії атак. Після цього дані заголовків пакетів та інформація про групування подаються на вхід багатощарового перцептрона, навченого розпізнавати аномальний трафік, але вже з урахуванням інформації про подію, тобто належності пакета до тієї чи іншої групи. У результаті тестування НМ отримані результати: помилка першого роду (помилкове спрацьовування) склала 3,16 %, а помилка другого роду (пропуск атаки) – 1,23 %. Технологічний університет імені короля Монгкута [5] провів подібний експеримент для виявлення таких типів атак: Neptune, Port Sweep і Satan. У ході експерименту поділено 121 820 навчальних шаблонів даних порівню на 8 наборів. Кожен набір об'єднується в мережу самоорганізованої карти, далі у тришаровий перцептрон, що складається з 70 нейронів у першому шарі, 12 нейронів у другому (прихованому) шарі та 4 нейронів у результуючому шарі. У результаті НМ в 90 % випадків виявляє атаку і має менше 5 % помилкових спрацьовувань.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Ми вважаємо, що під час обробки великого обсягу мережного трафіка, який постійно змінюється в інформаційно-телекомунікаційній системі залізничного транспорту, застосування системи виявлення мережних атак різних категорій на основі декількох MLP з використанням машинного навчання призводить до великої кількості помилкових спрацьовувань і пропусків атак, що потребує проведення додаткових досліджень для визначення оптимальних параметрів НМ.

Мета

Авторами передбачено розробити методику дослідження ефективності двох підходів до виявлення мережних атак на комп'ютерну мережу з використанням нейромережної технології на основі нормалізованих даних відкритої бази NSL–KDD.

Методика

Постановка задачі. Як архітектурні рішення пропонуємо розглянути такі підходи до виявлення мережних атак: на основі однієї нейронної мережі (НМ1) та ансамблю нейронних мереж (НМ2, НМ2–1, НМ2–2, НМ2–3, НМ2–4), рис. 1. НМ1 (за першим підходом) визначає, яким класом атаки уражена комп'ютерна мережа. При цьому кількість результуючих нейронів буде дорівнювати кількості класів атак, що виявляє НМ1. Комбінування декількох НМ (за другим підходом), а саме п'яти, сприяє тому, що: НМ2 визначає категорію атаки, НМ2–1, НМ2–2, НМ2–3, НМ2–4 визначають клас атаки: DoS, Probe, U2R, R2L відповідно, що належать до певної категорії.

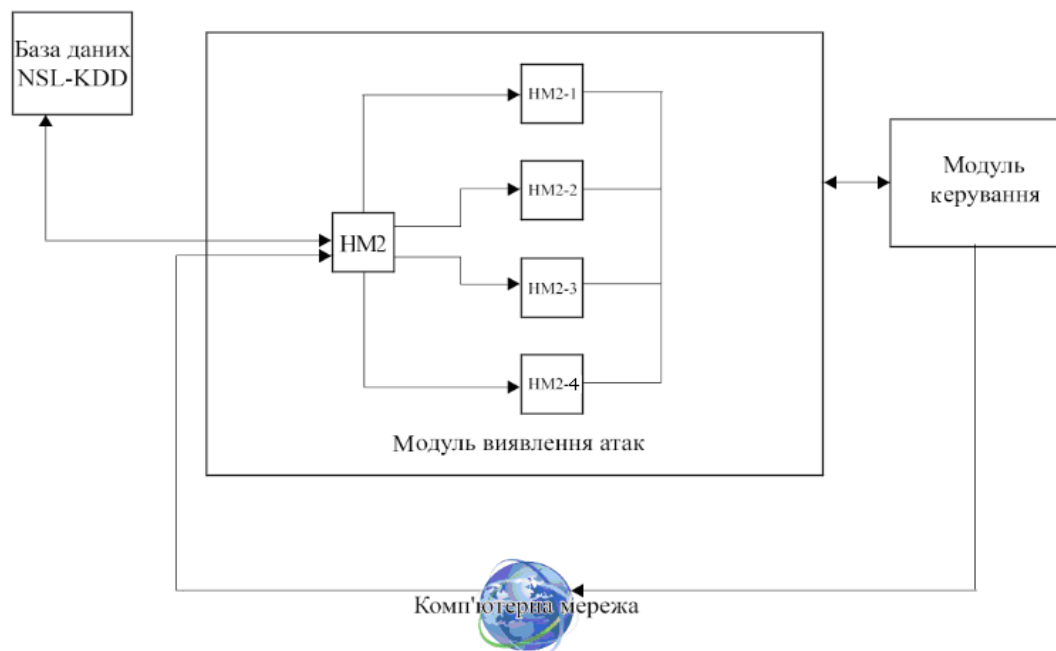


Рис. 1. Загальна схема виявлення мережних атак (за другим підходом)

Fig. 1. General scheme for detecting network attacks (according to the second approach)

У [13] виконано огляд наявних наборів даних, найбільш поширеним із яких є база даних NSL–KDD, що створена з ініціативи Управління перспективних дослідницьких проєктів Мі-

ністерства оборони США (DARPA) на основі бази даних KDD'99 [10]. Набір даних складається з таких множин [6]: KDDTest+, KDDTrain+, KDDTrain+20 % (табл. 1).

Таблиця 1

Розподілення атак у базі даних NSL–KDD

Table 1

Attacks distribution in the NSL-KDD database

Dataset	Total	Normal	DoS	Probe	U2R	R2L
KDDTrain+20%	25 192	13 449 (53 %)	9 234 (37 %)	2 289 (9,16 %)	11 (0,04 %)	209 (0,8 %)
KDDTrain+	125 973	67 343 (53 %)	45 927 (37 %)	11 656 (9,11 %)	52 (0,04 %)	995 (0,85 %)
KDDTest+	22 544	9 711 (43 %)	7 458 (33 %)	2 421 (11 %)	200 (0,9 %)	2 654 (12,1 %)

Еталон містить 43 параметри для кожного запису, причому 41 із них стосується самого трафіка, а останні два – Label та Score. До табл. 2 [4] зведені можливі класи: DoS – мережні атаки, спрямовані на виникнення ситуації, коли на атакованій системі відбувається відмова в обслуговуванні; Probe полягає в скануванні мережних портів із метою отримання конфіденційної інформації; U2R передбачає отримання зареєстрованим користувачем привілеїв локального суперкористувача; R2L характеризується отриманням доступу незареєстрованого користувача до комп'ютера з віддаленого комп'ютера та відповідні типи атак. Хоча всі атаки існують у базі даних, але розподіл їх надто спотворений, як це видно в табл. 1. Більше половини записів, що існують в кожному наборі даних, відображають нормальний стан, а еталонів для класів U2R і R2L украй мало. Це точно уявлення про розподіл сучасних атак на інтернет-трафіка, де найбільш поширені атаки класу DoS, а атаки класів U2R і R2L практично не зустрічаються.

Вхідним вектором є набір із 41 параметра TCP–з'єднання, фрагмент опису якого наведено в табл. 3.

Нормалізація даних (підготовчий етап). Для моделювання НМ, що призначені виявляти атаки на комп'ютерну мережу, потрібно виконати нормалізацію даних. Проведено аналіз за кількістю еталонів кожного класу атак. Атаки, які мали менше 200 еталонів, виключені розгляду. У результаті залишилися 22 класи атак: 9 класів категорії DoS; 6 класів категорії Probe; 2 класи категорії U2L та 5 класів категорії R2L (див. табл. 2).

Таблиця 2

Класи атак у базі NSL–KDD

Table 2

NSL-KDD database attack classes

DoS	Probe	U2R	R2L
Apache2*	Ipsweep*	Buffer_ overflow*	Ftp_ write
Back*	Mscan*	Load_ module	Guess_ passwd*
Land*	Nmap*	Perl	Httpunnel*
Neptune*	PortswEEP*	Ps	Lmap
Pod*	Saint*	Rootkit*	Multihop*
Mail_ bomb*	Satan*	Sqlattack	Named
Process_ table*		Xterm	Phf
Smurf*			Sendmail
Teardrop*			Snmppetattack
Udpstorm			Spy
Worm			Snmppguess
			Warezclient*
			Wazemaster*
			Xlock
			Xsnoop
9 із 11	6 із 6	2 із 7	5 із 15

Примітка: * тип атаки, який розглядають на НМ

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Таблиця 3

Опис початкових елементів

Table 3

Description of the initial elements

Вектор	Параметр	Опис
X_1	Duration	Час з'єднання
X_2	Protocol Type	Тип протоколу
X_3	Service	Мережна служба
X_4	Flag	Статус з'єднання
...
X_{41}	Sroce	Складність рівня

Далі сформовано 20 таблиць з еталонами (по 10 за кожним підходом). Перша таблиця мала по 2 еталони кожного класу атак (усього 44 еталони атак) і 56 еталонів класу Normal, таким чином, у першій таблиці 100 еталонів. У другій таблиці кількість еталонів атак і еталони типу Normal збільшено. У всіх наступних таблицях кількість еталонів збільшувалася, у результаті сформовано 10 таблиць, що використовуються (за другим підходом) із такою кількістю еталонів: 100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900 і 1 000. За першим підходом використано подібний спосіб, але всі значення збільшені у 10 разів, у результаті сформовано 10 таблиць (при цьому одна з таблиць, що містить 1 000 еталонів, не формувалася, а запозичена з тих таблиць, які використовувались за іншим підходом), із такою кількістю еталонів: 1 000, 2 000, 3 000, 4 000, 5 000, 6 000, 7 000, 8 000, 9 000 і 10 000. Причиною збільшення кількості еталонів є те, що НМ має велику кількість результатуючих елементів.

Окремо сформована контрольна вибірка: по 10 еталонів для кожної атаки і 30 еталонів типу Normal; усього 250 еталонів. Проведено аналіз кожного параметра у відповідних таблицях. Зокрема, 20-ий стовпець, а саме параметр Num Outbound Cmds, який характеризує кількість вихідних команд із ФТТР-сервера, завжди має одне й те саме значення – 0. У результаті прийнято рішення видалити цей параметр з усіх таблиць, оскільки він лише збільшує тривалість

навчання НМ і не несе ніякого смислового значення.

Крім того, сформовано додаткові таблиці з 23 стовпцями для НМ1, у яких лише одна комірка зі значенням 1 (це значення характеризує, до якого класу належить еталон залежно від розташування його в рядку), а інші значення – 0. За таким принципом сформовано додаткові таблиці і для інших НМ, які будуть виявляти атаку (за другим підходом). Наступний крок – це перетворення параметрів, які містили дані типу String, а саме заміна їх на числові коефіцієнти. Причиною такого перетворення є обмеження нейропакета Neural Network Toolbox, ця утиліта не може працювати з даними типу String або Char. До таких параметрів належить: Тип протоколу, Сервіс, Flag. Наприклад, параметр Тип протоколу має три значення, кожному з яких присвоєний числовий коефіцієнт: протоколу Icmp присвоєно значення 0; протоколу Tcp – значення 1; протоколу Udp – значення 2.

Багатошарова нейронна мережа як математичний апарат. Кількість нейронів у прихованому шарі багатошарової НМ можна визначити за відомою формулою, що є наслідком теореми Колмогорова–Арнольда–Хехт–Нильсена:

$$\frac{N_y Q}{1 + \log_2(Q)} \leq N_w \leq N_y \left(\frac{Q}{N_x} + 1 \right) (N_x + N_y + 1) + N_y, \quad (1)$$

де N_y – довжина вихідного сигналу; Q – кількість елементів множини навчальних прикладів; N_w – необхідна кількість синаптичних зв'язків; N_x – розмірність вхідного сигналу.

Оцінивши необхідну кількість синаптичних зв'язків, можна розрахувати необхідну кількість нейронів у прихованому шарі (N):

$$N = \frac{N_w}{N_x + N_y}.$$

Для всіх НМ проведено розрахунок мінімальної (N_{\min}), середньої (N_{avg}) та максимальної (N_{\max}) кількості прихованих нейронів (табл. 4). Як приклад на рис. 2 зображена конфігурація НМ2 за максимальної кількості прихованих

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

нейронів: 41–1–8–4, де 41 – кількість початкових нейронів; 1 – кількість прихованих шарів; 8 – кількість прихованих нейронів; 4 – кількість результуючих нейронів (якщо $Y_1 = 1$, то катего-

рія DoS; якщо $Y_2 = 1$, то категорія Probe; $Y_3 = 1$, то категорія U2R; $Y_4 = 1$, то категорія R2L; інакше $Y_i = 0$, де $i = 1, \dots, 4$).

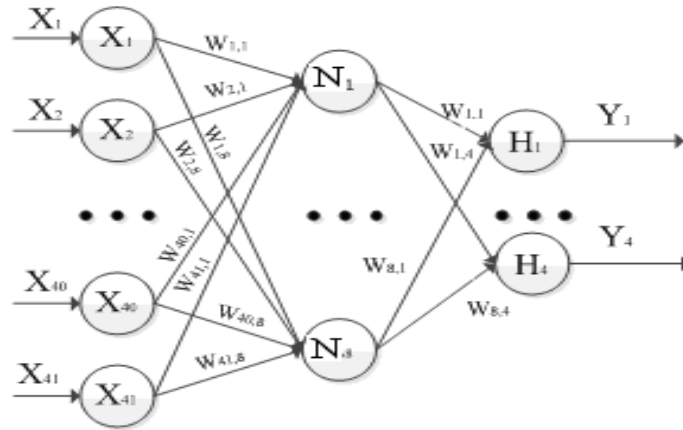


Рис. 2. НМ2 конфігурації 41–1–8–4

Fig. 2. НМ2 configurations 41–1–8–4

Дослідження похибки навчання НМ. На створених НМ за допомогою пакета Neural Network Toolbox програми MatLAB проведено дослідження значення MSE від довжини навчальної вибірки за алгоритмами навчання: Levenberg-Marquardt; Bayesian Regularization; Scaled Conjugate Gradient за різної кількості прихованих нейронів (N_{\min} , N_{avg} , N_{\max}). Най-

менше значення похибки навчання завжди надає алгоритм Levenberg-Marquardt, отримані результати подано в табл. 4.

Із таблиці видно, що у всіх випадках достатньо використання мінімальної кількості прихованих нейронів. Так, наприклад, для НМ2 найменше значення MSE досягається за вибірки з 500 навчальних еталонів.

Таблиця 4

Параметри НМ за алгоритмом Levenberg-Marquardt

Table 4

НМ parameters according to Levenberg-Marquardt algorithm

НМ	Призначення НМ	Кількість прихованих нейронів			Оптимальна конфігурація НМ	Кількість навчальних еталонів	MSE
		N_{\min}	N_{avg}	N_{\max}			
НМ1	Виявлення типу атаки	33	313	593	41–1–33–23	7 000	2,71
НМ2	Виявлення категорії класу атаки	8	56	104	41–1–8–4	500	3,79
НМ2–1	Виявлення типу атаки категорії DoS	16	138	259	41–1–16–9	500	3,74
НМ2–2	Виявлення типу атаки категорії Probe	12	84	156	41–1–12–6	400	4,79
НМ2–	Виявлення типу атаки категорії U2R	4	28	52	41–1–4–2	300	1,47
НМ2–4	Виявлення типу атаки категорії R2L	10	70	130	41–1–10–5	400	1,98

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Результати

Перше дослідження: дослідження часу роботи НМ. Для цього в програмі MatLAB використано функцію tic/toc, яка замірює час роботи коду та зберігає його в секундному значенні. За НМ1 узятю конфігурацію 41–1–33–23 з довжиною вибірки із 7 000 прикладів (перший підхід). Для реалізації другого підходу обрано такі конфігурації: 41–1–8–4 (НМ2, 500 еталонів); 41–1–16–9 (НМ2–1, 500 еталонів); 41–1–12–6 (НМ2–2, 400 еталонів); 41–1–4–2 (НМ2–3, 300 еталонів); 41–1–10–5 (НМ2–4, 400 еталонів).

Окрім того, написано скрипт, що працює за таким принципом: у разі визначення певної категорії вхідний вектор передається на ту НМ, яка виявляє клас атаки певної категорії, що була визначена НМ2. Розглянуто три паралельні серії за чотирьох можливих комбінацій виявлення загроз на основі ансамблю НМ, отримані результати зведено до табл. 5. Із таблиці видно, що в середньому виявлення мережних загроз на НМ1 (за першим підходом) складає 2,21 с, за другим підходом – 0,92 с. Тобто використання ансамблю з п'яти НМ швидше приблизно в 2,4 раза.

Таблиця 5

Результати першого дослідження (часу роботи НМ за можливими комбінаціями, с)

Table 5

The results of the first study (HM operating time according to possible combinations, s)

НМ	1 серія				2 серія				3 серія			
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
НМ1	2,41	1,97	2,07	1,71	2,00	2,02	2,17	1,99	2,22	2,00	2,10	1,89
НМ2	0,40	0,54	0,54	0,59	0,68	0,67	0,43	0,37	0,58	0,63	0,48	0,48
НМ2–1	0,77	–	–	–	0,77	–	–	–	0,97	–	–	–
НМ2–2	–	0,56	–	–	–	0,28	–	–	–	0,44	–	–
НМ2–3	–	–	0,05	–	–	–	0,06	–	–	–	0,04	–
НМ2–4	–	–	–	0,26	–	–	–	0,22	–	–	–	0,24
Загальний час, с (2-й підхід)	1,17	1,10	0,59	0,85	1,45	0,95	0,49	0,59	1,55	1,07	0,52	0,72

Друге дослідження: дослідження помилки першого роду. Помилка першого роду – це кількість неправильно виявлених атак (FP, False Positive). Результати дослідження помилки першого роду зведено до табл. 6. Із таблиці видно, що помилка першого роду на НМ1 складає 7,39 %, а в разі використання ансамблю нейронних мереж НМ2, НМ2–1, НМ2–2, НМ2–3, НМ2–4 (другий підхід) – 2,17 %.

Третє дослідження: дослідження помилки другого роду. Помилка другого роду – це кількість пропусків атак (FN, False Negative). Результати дослідження помилки другого роду подано в табл. 7. Із таблиці видно, що помилка другого роду на НМ1 складає 6,96 %, а в разі використання ансамблю НМ (другий підхід) – 3,91 %.

Таблиця 6

Результати другого дослідження (кількості неправильно виявлених атак)

Table 6

The results of the second study (number of incorrectly detected attacks)

Категорія (клас) атаки	1-й підхід	2-й підхід				
	HM1	HM2	HM2-1	HM2-2	HM2-3	HM2-4
DoS	–	20 зі 900	–	–	–	–
Probe	–	10 зі 600	–	–	–	–
U2R	–	10 зі 200	–	–	–	–
R2L	–	10 зі 500	–	–	–	–
Normal	0 зі 100	0 зі 100	–	–	–	–
Ipsweep	20 зі 100	–	–	0 зі 100	–	–
Satan	10 зі 100	–	–	0 зі 100	–	–
Portsweep	10 зі 100	–	–	0 зі 100	–	–
Nmap	0 зі 100	–	–	10 зі 100	–	–
Saint	20 зі 100	–	–	0 зі 100	–	–
Mscan	20 зі 100	–	–	0 зі 100	–	–
Neptune	20 зі 100	–	0 зі 100	–	–	–
Smurf	0 зі 100	–	10 зі 100	–	–	–
Back	0 зі 100	–	0 зі 100	–	–	–
Teardrop	10 зі 100	–	0 зі 100	–	–	–
Pod	0 зі 100	–	0 зі 100	–	–	–
Land	0 зі 100	–	0 зі 100	–	–	–
Apache2	0 зі 100	–	10 зі 100	–	–	–
Mailbomb	10 зі 100	–	0 зі 100	–	–	–
Processtable	10 зі 100	–	0 зі 100	–	–	–
Buffer_overflow	0 зі 100	–	–	–	10 зі 100	–
Rootkit	20 зі 100	–	–	–	0 зі 100	–
Httpunnel	0 зі 100	–	–	–	–	0 зі 100
Guess_passwd	0 зі 100	–	–	–	–	0 зі 100
Wazemaster	0 зі 100	–	–	–	–	0 зі 100
Multihop	20 зі 100	–	–	–	–	10 зі 100
Warezcilent	0 зі 100	–	–	–	–	0 зі 100
Усього:	170 зі 2 300	50 зі 2 300				

Таблиця 7

Результати третього дослідження (кількості пропусків атак)

Table 7

The results of the third study (number of missed attacks)

Категорія (клас) атаки	1-й підхід	2-й підхід				
	HM1	HM2	HM2-1	HM2-2	HM2-3	HM2-4
DoS	–	30 зі 900	–	–	–	–
Probe	–	20 зі 600	–	–	–	–
U2R	–	20 зі 200	–	–	–	–
R2L	–	20 зі 500	–	–	–	–
Normal	10 зі 100	0 зі 100	–	10 зі 100	–	–
Ipsweep	0 зі 100	–	–	0 зі 100	–	–
Satan	20 зі 100	–	–	0 зі 100	–	–
Portsweep	0 зі 100	–	–	0 зі 100	–	–
Nmap	10 зі 100	–	–	0 зі 100	–	–
Saint	10 зі 100	–	–	0 зі 100	–	–
Mscan	10 зі 100	–	10 зі 100	–	–	–
Neptune	0 зі 100	–	0 зі 100	–	–	–
Smurf	0 зі 100	–	0 зі 100	–	–	–
Back	10 зі 100	–	0 зі 100	–	–	–
Teardrop	0 зі 100	–	0 зі 100	–	–	–
Pod	0 зі 100	–	0 зі 100	–	–	–
Land	10 зі 100	–	10 зі 100	–	–	–
Apache2	0 зі 100	–	0 зі 100	–	–	–
Mailbomb	10 зі 100	–	0 зі 100	–	–	–
Processtable	0 зі 100	–	0 зі 100	–	–	–
Buffer_overflow	20 зі 100	–	–	–	10 зі 100	–
Rootkit	20 зі 100	–	–	–	0 зі 100	–
Httpunnel	0 зі 100	–	–	–	–	10 зі 100
Guess_passwd	10 зі 100	–	–	–	–	0 зі 100
Wazemaster	0 зі 100	–	–	–	–	0 зі 100
Multihop	0 зі 100	–	–	–	–	0 зі 100
Warezcilent	20 зі 100	–	–	–	–	0 зі 100
Усього:	160 зі 2 300	90 зі 2 300				

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

Наукова новизна та практична значимість

У ході проведення експериментів на НМ (рис. 3) отримано такі результати: TP (True Positive); FP (False Positive); FN (False Negative); TN (True Negative), на основі яких на завершальному етапі залишилось дати оцінку якості рішень за різними підходами (табл. 8).

TP 1950	FP 170	TP 2150	FP 50
FN 160	TN 20	FN 90	TN 10
1-й підхід		2-й підхід	

Рис. 3. Результати моделювання

Fig. 3. Simulation results

Таблиця 8

Показники оцінки якості рішень за різними підходами

Table 8

Indicators for assessing the quality of solutions according to different approaches

Показник	TP	FP	FN	TN	TPR	FPR	Accuracy	Precision	Recall
1-й підхід	1950	170	160	20	0,92	0,89	0,86	0,92	0,92
2-й підхід	2150	50	90	10	0,96	0,83	0,94	0,98	0,96

Із таблиці видно, що найкращі результати досягаються на основі використання ансамблю НМ (другий підхід): TPR (показник коректності визначення мережних атак) складає 0,96 (проти 0,92); FPR (показник помилкових спрацьовувань) – 0,83 (проти 0,89); достовірність (Accuracy) – 0,94 (проти 0,86), точність (Precision) – 0,98 (проти 0,92) і повнота (Recall) – 0,96 (проти 0,92) порівнянно з першим підходом на основі НМ1.

Висновки

1. Проведений огляд наукових джерел показав, що для виявлення атак на комп'ютерну мережу можливе використання багатошарового перцептрона, самоорганізованої карти та комбінованого підходу. Як математичний апарат для розв'язання поставленої задачі обрано багатошаровий перцептрон, як нейрозасіб – пакет Neural Network Toolbox програми MatLAB.

2. Виявлення атак на комп'ютерну мережу здійснено за допомогою двох підходів: використання багатошарової нейронної мережі (НМ1, перший підхід), на вхід якої подається 41 параметр із метою класифікації 22 класів атак; використання ансамблю із п'яти нейронних мереж (НМ2; НМ2–1; НМ2–2; НМ2–3; НМ2–4, другий підхід) для визначення категорії атаки DoS, Probe, U2R чи R2L (на першому етапі) та

визначення класу атаки відповідно до категорії (на другому етапі). Для моделювання НМ використовуються нормалізовані дані з відкритої бази NSL–KDD.

3. Проведено дослідження похибки НМ від довжини вибірки за різними алгоритмами навчання: Levenberg–Marquardt, Bayesian Regularization, Scaled Conjugate Gradient за різної кількості прихованих нейронів (мінімальної, середньої та максимальної). Визначено оптимальні параметри НМ. Так, наприклад, найменше значення $MSE = 3,79$ досягається на НМ2 за 8 прихованих нейронів на вибірці з 400 прикладів за методом Levenberg–Marquardt.

4. На створених НМ за різними підходами проведено такі дослідження: часу роботи (перше дослідження); помилки першого роду (друге дослідження); помилки другого роду (третє дослідження). За результатами першого дослідження в середньому час роботи ансамблю НМ складає 0,92 с, а час НМ1 – 2,21 с, що менше приблизно в 2,4 раза. За результатами другого дослідження помилка першого роду з використанням ансамблю НМ складає 2,17 %, а на НМ1 – 7,39 %, за результатами третього дослідження помилка другого роду з використанням ансамблю НМ складає 3,91 %, а на НМ1 – 6,96 %, що доводить доцільність використання другого підходу.

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

5. На основі отриманих даних дано оцінку якості рішень за різними підходами. Найкращі результати досягаються на основі використання ансамблю НМ (другий підхід): показник коректності визначення мережних атак складає 0,96 (проти 0,92); показник помилкових спрацьовувань – 0,83 (проти 0,89); достовірність – 0,94 (проти 0,86), точність – 0,98 (проти 0,92) і повнота – 0,96 (проти 0,92) порівнянно з першим підходом на основі НМ1.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Крыжановский А. В. Применение искусственных нейронных сетей в системах обнаружения атак. *Доклады ТУСУР*. 2008. № 2 (18). Ч. 1. С. 104–105.
2. Мустафаев А. Г. Нейросетевая система обнаружения компьютерных атак на основе анализа сетевого трафика. *Вопросы безопасности*. 2016. № 2. С. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.7256.2409-7543.2016.2.18834>
3. Тарасов Я. В. Метод определения низкоинтенсивных DDOS-атак на основе гибридной нейронной сети. *Известия ЮФУ: Технические науки*. 2014. № 8. С. 47–48.
4. A Deeper Dive into the NSL-KDD Data Set. URL: <https://towardsdatascience.com/a-deeper-dive-into-the-nsl-kdd-data-set-15c753364657> (дата звернення: 14.05.2020).
5. Chaivat J., Naruemon W., Prasert K. *Hybrid Neural Networks for Intrusion Detection System*. 2002. URL: <https://www.researchgate.net/publication/266608342> (дата звернення: 14.05.2020).
6. CIC DATASET FORM for «NSL-KDD». URL: <http://205.174.165.80/CICDataset/NSL-KDD/Dataset/> (дата звернення: 14.05.2020).
7. Grill M., Pevný T., Rehak M. Reducing false positives of network anomaly detection by local adaptive multivariate smoothing. *Journal of Computer and System Sciences*. 2017. Vol. 83. Iss. 1. P. 43–57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcss.2016.03.007>
8. Gunes K. H., Nur Z.-H. A., Heywood M. I. A hierarchical SOM-based intrusion detection system. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2007. Vol. 20. Iss. 4. P. 439–451. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.engappai.2006.09.005>
9. Kruti C., Bhavin S., Omprya K. Improving user-to-root and remote-to-local attacks using growing hierarchical self organizing map. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*. 2015. Vol. 4, № 6. P. 611–618
10. *NSL-KDD dataset*. Canadian Institute for Cybersecurity. URL: <https://www.unb.ca/cic/datasets/nsl.html> (дата звернення: 14.05.2020).
11. Ortiz A. *Improving Network Intrusion Detection with Growing Hierarchical Self-Organizing Maps*. 2011. URL: <https://pdfs.semanticscholar.org/f3fb/cf7dfd84d9f2f2ace73580c32eb7c469b6e7.pdf>
12. Palomo E. J., Domínguez E., Luque R. M., Muñoz J. *A new GHSOM Model applied to network security*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008. P. 680–689. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-540-87536-9_70
13. Ring M., Wunderlich S., Scheuring D., Landes D., Hotho A. A Survey of Network-based Intrusion Detection Data Sets. *Computers & Security*. 2019. Vol. 86. P. 147–167. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cose.2019.06.005>
14. Saied A., Overill R. E., Radzik T. Detection of known and unknown DDoS attacks using Artificial Neural Networks. *Neurocomputing*. 2016. Vol. 172. P. 385–393. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.04.101>
15. Zhukovyts'kyu I. V., Pakhomova V. M. Identifying threats in computer network based on multilayer neural network. *Наука та прогрес транспорту*. 2018. № 2 (74). С. 114–123. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/130797>

В. Н. ПАХОМОВА^{1*}, М. С. КОННОВ^{2*}

^{1*}Каф. «Електронні висчислювальні машини», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, ел. пошта viknikpakh@gmail.com, ORCID 0000-0002-0022-099X

^{2*}Каф. «Електронні висчислювальні машини», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 89, ел. пошта mkonnov1997@gmail.com, ORCID 0000-0001-7212-7631

ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХ ПОДХОДОВ К ВЫЯВЛЕНИЮ СЕТЕВЫХ АТАК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ

Цель. На современном этапе чаще всего предлагают системы обнаружения сетевых атак, построенные на основе следующих нейронных сетей: многослойного персептрона, сети Кохонена или самоорганизующейся карты и их комбинаций. В статье предусмотрено исследовать эффективность двух подходов к выявлению атак на компьютерную сеть с использованием нейросетевой технологии на основе нормализованных данных открытой базы NSL–KDD. **Методика.** В качестве архитектурного решения системы обнаружения сетевых атак предложено рассмотреть следующие подходы: на основе одной нейронной сети, определяющей класс атаки (первый подход), и ансамбля из пяти нейронных сетей (второй подход), который на первом этапе определяет категорию атаки (DoS, Probe, U2R, R2L), а на втором этапе – класс атаки, относящийся к определенной категории. **Результаты.** На созданных в программе MatLAB нейронных сетях проведено исследование их ошибки от длины выборки по различным алгоритмам обучения: Levenberg–Marquardt; Bayesian Regularization; Scaled Conjugate Gradient – при разном количестве скрытых нейронов (минимальном, среднем и максимальном). Определены оптимальные параметры нейронных сетей для двух подходов. **Научная новизна.** В ходе проведения экспериментов для двух подходов получены результаты: TP (True Positive); FP (False Positive); FN (False Negative); TN (True Negative). На их основе рассчитаны следующие показатели оценки качества решений: корректность определения сетевых атак; ложные срабатывания; достоверность; точность и полнота, что доказывают целесообразность использования ансамбля нейронных сетей (второго подхода). **Практическая значимость.** На созданных нейронных сетях для обоих подходов проведены исследования: времени работы нейронных сетей; ошибки первого рода; ошибки второго рода. По результатам первого исследования в среднем время работы ансамбля нейронных сетей составляет 0,92 с, а время работы нейронной сети (первый подход) достигает 2,21 с. По результатам второго исследования ошибка первого рода на ансамбле нейронных сетей составила 2,17 %, а на нейронной сети (первый подход) – 7,39 %. По результатам третьего исследования ошибка второго рода на ансамбле нейронных сетей составила 3,91 %, а на нейронной сети (первый подход) – 6,96 %, что подтверждает эффективность использования ансамбля нейронных сетей (второй подход).

Ключевые слова: атака; ансамбль; нейронная сеть; ошибка первого рода; ошибка второго рода; достоверность; точность; полнота

V. M. PAKHOMOVA^{1*}, M. S. KONNOV^{2*}

^{1*}Dep. «Electronic Computing Machines», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 89, e-mail viknikpakh@gmail.com, ORCID 0000-0002-0022-099X

^{2*}Dep. «Electronic Computing Machines», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 89, e-mail mkonnov1997@gmail.com, ORCID 0000-0001-7212-7631

RESEARCH OF TWO APPROACHES TO DETECT NETWORK ATTACKS USING NEURAL NETWORK TECHNOLOGIES

Purpose. At the present stage, network attack detection systems based on the following neural networks are most often offered: multilayer perceptron, Kohonen network or self-organizing map and their combinations. The efficiency problem of two approaches to detect attacks on a computer network using neural network technology based on the normalized data of the open NSL–KDD database is considered. **Methodology.** As an architectural solution to the network attack detection system, it is proposed to consider the following approaches: based on one neural network determining the attack class (first approach) and an ensemble of five neural networks (second approach), which at the first stage determines the attack category (DoS, Probe, U2R, R2L), and in the second stage, the attack class belonging to a certain category. **Findings.** Based on the neural networks created in the MatLAB program, a study was conducted of their error on the length of the training sample using various training algorithms: Levenberg–Marquardt; Bayesian Regularization; Scaled Conjugate Gradient with different numbers of hidden neurons (minimum, average and maximum). Certain optimal parameters of neural networks with two approaches were determined. **Originality.** In the course of

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

conducting experiments with various approaches, the results obtained were: TP (True Positive); FP (False Positive); FN (False Negative); TN (True Negative), based on which the following indicators were calculated for assessing the quality of solutions: correct determination of network attacks; false positives; reliability; accuracy and completeness, which prove the feasibility of using an ensemble of neural networks (second approach). **Practical value.** On the created neural networks with various approaches, studies were conducted: the operating time of neural networks; errors of the first kind; errors of the second kind. According to the results of the first study, the average operating time of an ensemble of neural networks is 0.92 s, and the operating time of a neural network (according to the first approach) is 2.21 s. According to the results of the second study, the error of the first kind using an ensemble of neural networks is 2.17%, and using the neural network (the first approach) – 7.39%. According to the results of the third study, the error of the second kind using an ensemble of neural networks is 3.91%, and using the neural network (the first approach) – 6.96%, which is confirmed by the efficiency of using an ensemble of neural networks (second approach).

Keywords: attack; ensemble; neural network; error of the first kind; error of the second kind; reliability; accuracy; completeness

REFERENCES

1. Krjizjanovsky, A. V. (2008). Application of artificial neural networks in systems of attacks detection. *Doklady TUSUR*, 2(18), 104-105. (in Russian)
2. Mustafaev, A. G. Neyrosetevaya sistema obnaruzheniya kompyuternykh atak na osnove analiza setevogo trafika. *Voprosy bezopasnosti*, 2, 1-7. DOI: <https://doi.org/10.7256/2409-7543.2016.2.18834> (in Russian)
3. Tarasov, Ya. V. (2014). Metod opredelennya nizkointensivnykh DDOS atak na osnove gibridnoy neyronnoy seti. *Izvestiya sfedu. Engineering sciences*, 8, 47-58. (in Russian)
4. A Deeper Dive into the NSL-KDD Data Set. Retrieved from <https://towardsdatascience.com/a-deeper-dive-into-the-nsl-kdd-data-set-15c753364657>
5. Chaivat, J., Naruemon, W., & Prasert, K. (2002). *Hybrid Neural Networks for Intrusion Detection System*. Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/266608342> (in English)
6. CIC DATASET FORM for «NSL-KDD». Retrieved from <http://205.174.165.80/CICDataset/NSL-KDD/Dataset/> (in English)
7. Grill, M., Pevný, T., & Rehak, M. (2017). Reducing false positives of network anomaly detection by local adaptive multivariate smoothing. *Journal of Computer and System Sciences*, 83(1), 43-57. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcss.2016.03.007> (in English)
8. Gunes, K. H., Nur, Z.-H. A., & Heywood, M. I. (2007). A hierarchical SOM-based intrusion detection system. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 83(1), 439-451. (in English)
9. Kruti, C., Bhavin, S., & Ompriya, K. (2015). Improving user-to-root and remote-to-local attacks using growing hierarchical self organizing map. *International Journal of Engineering Sciences & Research Technology*, 4(6), 611-318. (in English)
10. *NSL-KDD dataset*. Canadian Institute for Cybersecurity. Retrieved from <https://www.unb.ca/cic/datasets/nsl.html> (in English)
11. Ortiz, A. (2011). *Improving Network Intrusion Detection with Growing Hierarchical Self-Organizing Maps*. Retrieved from <https://pdfs.semanticscholar.org/f3fb/cf7dfd84d9f2f2ace73580c32eb7c469b6e7.pdf> (in English)
12. Palomo, E. J., Domínguez, E., Luque, R. M., & Muñoz, J. (2008). *A new GHSOM Model applied to network security* (pp. 680-689). Springer Berlin Heidelberg. (in English)
13. Ring, M., Wunderlich, S., Scheuring, D., Landes, D., & Hotho, A. (2019). A survey of network-based intrusion detection data sets. *Computers & Security*, 86, 147-167. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cose.2019.06.005> (in English)
14. Saied, A., Overill, R. E., & Radzik, T. (2016). Detection of known and unknown DDoS attacks using Artificial Neural Networks. *Neurocomputing*, 172, 385-393. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2015.04.101> (in English)
15. Zhukovyts'kyi, I. V., & Pakhomova, V. M. (2018). Identifying threats in computer network based on multilayer neural network. *Science and Transport Progress*, 2(74), 114-123. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/130797> (in English)

Надійшла до редколегії: 21.01.2020

Прийнята до друку: 21.05.2020

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

UDC 669:[539.43:539.56]

I. O. VAKULENKO^{1*}, D. M. BOLOTOVA², S. V. PROIDAK³, H. ASKEROV⁴, H. CUG⁵,
H. O. TCHAIKOVSKA⁶

^{1*}Dep. «Applied Mechanics and Materials Science», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 56, e-mail vakulenko_igor@ukr.net, ORCID 0000-0002-7353-1916

²Dnipro Lyceum of Railway Transport, Universalna St., 7, Dnipro, Ukraine, 49024, tel.+38 (098) 351 99 70, e-mail dasha.bolotova@i.ua, ORCID 0000-0001-6947-3963

³Dep. «Applied Mechanics and Materials Science», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 56, e-mail proydak.sv@ukr.net, ORCID 0000-0003-2439-3657

⁴Dep. «Mechanical Engineering», Karabuk University, Karabuk, Turkey, 78050, tel. +90 (538) 455 04 45, e-mail hangardasaskerov@karabuk.edu.tr, ORCID 0000-0003-4771-3406

⁵Dep. «Mechanical Engineering», Karabuk University, Karabuk, Turkey, 78050, tel. +90 (544) 842 62 08, e-mail harun1878@gmail.com, ORCID 0000-0002-6322-4269

⁶Dep. «Materials Science and Materials Processing», Prydniprovsk State Academy of Civil Engineering and Architecture, Chernyshevskoho St., 24a, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (095) 618 14 63, e-mail chaikovska.hanna@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0001-6707-0159

FORMATION OF CARBON STEEL STRUCTURE DURING HOT PLASTIC DEFORMATION

Purpose. The main purpose of the work is to determine the peculiarities of the development of recrystallization processes of carbon steel austenite depending on the degree of hot plastic deformation and to develop proposals for improving the structural state of the metal of the railway solid-rolled wheel. **Methodology.** Two carbon steels of a railway wheel with a minimum and maximum carbon content of 0.55 and 0.65 % and other chemical elements within the grade composition of the steel 60 were used as research material. Samples in the form of cylinders with a diameter of 20 mm and a height of 40 mm were heated in a muffle furnace, exposed for a certain time to equalize the temperature across the cross section of the sample. After that, the samples were subjected to hot compression on Instron type test machine. The temperature interval of hot compression of the samples was 950–1100 °C, with deformation degrees in height in the range of 10–40%. The strain rate was 10^{-3} – 10^{-2} sec⁻¹. A standard etching was used to detect the boundaries of the austenite grains. Structural studies were performed using Epikvant type light microscope at magnifications sufficient to determine the structure of austenite grains. The grain size of austenite was determined by the methods of quantitative metallography. **Findings.** In the case of hot compression of the railway wheel blank, increasing the concentration of carbon atoms only within the grade composition of the steel is sufficient to increase the average austenite grain size, which confirms the proposals to limit the carbon content in the metal of railway wheels. The formation of a certain degree of austenite structural heterogeneity at the cross section of the rim or hub of the railway wheel is due to a change in the development mechanism of recrystallization processes depending on the deformation value. Under conditions of the same degree of hot plastic deformation, the replacement of one-time compression by fractional one is accompanied by a violation of the conditions of formation of the recrystallization nucleus. As a result of the specified replacement of the scheme of hot plastic deformation we obtain reduction in the austenite grain size. **Originality.** Based on a study of the development of collective recrystallization processes during the hot compression of carbon steel of the railway wheel, it was determined that the increase in carbon content contributes to the austenite grain increase. After hot compression of the wheel blank, the structural inhomogeneity of austenite that occurs is determined by a change in the mechanism of recrystallization

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

processes development. During deformations above the critical degree, the recrystallization nuclei are formed and successively grow, which leads to the structure refinement. In the case of deformations below the critical value, the growth of austenite grains occurs according to the coalescence mechanism, according to which fragments of boundaries with large disorientation angles consistently disappear. **Practical value.** For austenite grain refining in massive elements of solid-rolled railway wheel we offer to replace one-time hot compression by fractional one.

Keywords: austenite; deformation; temperature; grain size; carbon steel; railway wheel

Introduction

According to the technology of manufacturing a railway wheel, the blank is subjected to sequential hot compression on a press and rolling on a special state. According to the technology of manufacturing a railway wheel, the blank is subjected to sequential hot compression on a press and rolling on a special mill. The high temperature of hot compression, at the appropriate deformation degrees at each stage of wheel formation, leads to a significant structural inhomogeneity of the metal [4]. This structural inhomogeneity in the railway wheel blank is caused by the formation of a high degree of non-uniformity in the austenite grains size as the main phase of the high-temperature state of carbon steel. This heterogeneous structure is inherited after all subsequent treatments, which significantly reduces the overall set of metal properties of the railway wheel elements [2, 8]. The reasons for the formation of the austenite structure with relatively large and small adjacent grains are the increased diffusion rate and deformation gradient that occurs at the cross section of the wheel elements during hot compression of the blank. As a result, the metal layer located directly with the deforming tool is subjected to maximum compression, and the more distant layer corresponds to a decrease in the degree of hot plastic deformation [4]. Consequently, austenite grains grow to very large sizes in metal volumes that have been compressed at a degree close to critical (according to various estimates, at 8–10 % [1, 7]). At the same time, with slight exaggerations, the deformation of the critical value causes a corresponding dispersion of the austenitic structure, which together with grains of very large sizes will lead to uneven austenite structure as a whole. The formed austenite structure with different grains will inevitably have a negative effect on the structural state of the wheel metal after a separate heating and final heat-strengthening treatment – accelerated cooling [11, 12]. In proportion to the structural state, the set of

the metal properties at the cross section of the rim and the hub, which are the most massive elements of the railway solid-rolled wheel, will also change.

Purpose

The main purpose of the work is to determine the peculiarities of the development of recrystallization processes of carbon steel austenite depending on hot plastic deformation degree and to develop proposals for improving the structural state of the metal of the railway solid-rolled wheel.

Methodology

Two carbon steels of the railway wheel with a minimum and maximum carbon content of 0.55 and 0.65% and other chemical elements within the grade composition of the steel 60 were used as research material. Samples in the form of cylinders with a diameter of 20 mm and a height of 40 mm were heated in a muffle furnace, exposed for a certain time to equalize the temperature across the cross section of the sample. After that, the samples were subjected to hot compression on Instron type test machine. The temperature interval of hot compression of the samples was 950–1100 °C, with deformation degrees in height in the range of 10–40 %. The strain rate was 10^{-3} – 10^{-2} sec⁻¹. A standard etching was used to detect the boundaries of the austenite grains. Structural studies were performed using Epiquant type light microscope at magnifications sufficient to determine the structure of austenite grains. The austenite grain size was determined by the methods of quantitative metallography.

Findings

In the process of manufacturing solid-rolled railway wheels, the sequential compression of the blank in the roll openings of the rolling mill pressure equipment at temperatures of 1200–1250 °C is accompanied by the formation of significant structural inhomogeneity of carbon

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

steel. This is due to the high metal compression temperatures, the forms complexity and the different thickness of the individual elements of the railway wheel. Studies of the microstructure [3, 4] found that in the central volumes of the wheel rim, the degree of plastic deformation does not exceed 10 %, and near the rolling surface can reach 50-60 %. The discrepancy in the degree of plastic deformation at these temperatures of hot compression affects the development of austenite recrystallization processes, which in turn determines the final grain size. According to [9, 13], in the case of constant heating temperature, in proportion to the degree of plastic deformation above the critical value, the grain size of austenite will decrease. Based on this, the austenite grain size in the central volumes of the railway wheel rim, after hot pressing and taking into account the separate heating for thermal hardening and tempering, is approximately 0 or 1 point. Near the rolling surface, due to the higher degree of plastic deformation, it will not exceed 2–3 points [4]. In general, the formed metal structure is qualitatively correlated with the plots of the value distribution of the hot plastic deformation along the wheel elements. Thus, maximum compression is achieved in the rim, which leads to the formation of the austenite structure with a grain size of about 2 points. In the areas of the disk near the rim, the picture is much more complicated. The fact is that although the metal near the rim is much less compressed (compared to the rim), the austenite structure actually has a higher dispersion. The grain size for these metal volumes is 3–4 points [4]. This situation is due to the partial preservation of the consequences of hot hardening of austenite after the blank compression on a press of 100 MN (Fig. 1, *b*) before rolling on a rolling mill. The total effect from successive stages of hot deformation leads to the formation of a more dispersed structure of austenite with grain sizes up to 4 points.

Thus, the larger the metal cross section of a certain element of the railway wheel, the greater the unevenness in the austenite grain size should be expected. The austenite structure with different grains has a negative effect on the structural state of the wheel metal after separate heating and accelerated cooling. In proportion to the structural state, the set of the metal properties along the cross

section of the solid-rolled railway element will also change [13].

The railway wheel blank for hot compression is heated to temperatures significantly exceeding the completion of the single-phase austenitic structure formation. During a sufficiently long exposure to equalize the temperature at the cross section of the blank there is a significant increase in the austenite grain size. In addition to the effect of inhibiting the process of moving the austenite grain boundary in the case of the development of the collective recrystallization process, we should also expect the effect from the general carbon content in steel [1, 3]. The degree of exceeding the completion time of the austenitic transformation by the temperature will differently accelerate the process of increasing the austenitic grain size, depending on the concentration of carbon atoms within the grade composition of the railway wheel steel. Qualitative changes in grain sizes can be estimated by comparing real structures according to the accepted point scale. From the structure analysis, it was determined that the austenite structure with expected grain size corresponds to the higher heating temperatures. At the same time, according to the normative documentation, for carbon steel of the railway wheel it is allowed to change the carbon concentration within the grade composition by about 0.1 %. Taking into account this fact during the development of the hardening treatments technology, it is necessary to assess the possible change in the austenite grain size in steel with the maximum carbon content and the minimum value in the process of hot compression.

According to the analysis of the steel samples microstructure (Fig. 1, *a*) with a carbon content of 0.55 % after 10 % compression at a temperature of 950 °C, the formation of austenite grains in a shape close to polyhedron, with an average size of about 50–60 μm was detected. For the deformation temperature of 1100 °C, the formation of the austenite structure with significant inhomogeneity is observed simultaneously with the increase in the average grain size (Fig. 1, *b*). The presence of grains with a large difference in size in the steel structure can be considered as evidence of the beginning of the development of recrystallization by the coalescence mechanism [1, 6, 9]. At the same time, the structure of hot-deformed metal shows an increase

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

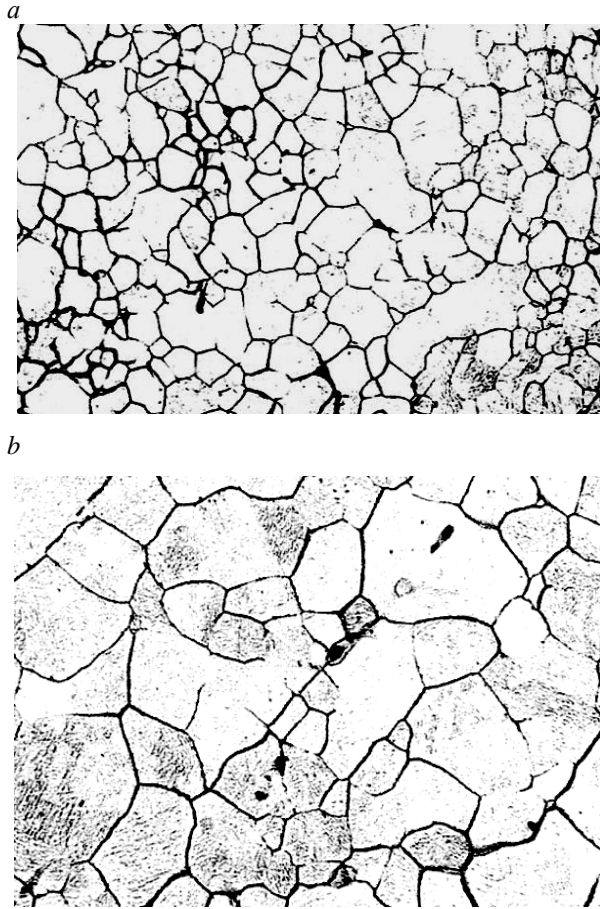


Fig. 1. Austenite steel structure with 0.55 % C after compression by 10 %, at the temperatures: *a* – 950 °C; *b* – 1100 °C. Magnification 100

in the number of grain boundaries with no individual fragments (Fig. 1, *b*). This feature indicates the beginning of abnormal grain growth, which causes a further increase in the austenite structure heterogeneity as a whole [1, 13]. Similar metal volumes (with no boundary sections), although in smaller quantities, were also determined in the structure at lower compression temperatures (Fig. 1, *a*). Increasing the carbon concentration in steel to 0.65 % did not result in qualitative changes in the nature of the formed austenite structure. First of all, it should be noted the invariance of the grains shape. At the same time, the average austenite grain size is more important for steel with high carbon content. Compared with steel with 0.55 % C, for the same temperatures and compression degrees (Fig. 1), the formed austenite structure visually has a larger average grain size (Fig. 2). Indeed, compared to the structures after the same deformation

conditions, for example, after compression by 10 %, for a temperature of 950 °C it can be determined that only increase in carbon concentration in steel by 0.1 % led to an increase in the austenite grain size by 30 μm . The above increase in relative values is approximately 30%. At the same time, the austenite structure heterogeneity as a whole has increased. For the studied steels, the obtained dependences of the austenite grain size on the temperature and the degree of hot compression qualitatively coincide with the known results of experimental studies [3, 4, 12].

Thus, in order to increase the structure uniformity and reduce the austenite grain size after the hot compression of the railway wheel blank, it may be proposed to increase the role of hot metal hardening. Thus, during the rim profile formation, taking into account the limited power of the rolling mill, you can increase the degree of hot hardening by lowering the compression temperature.

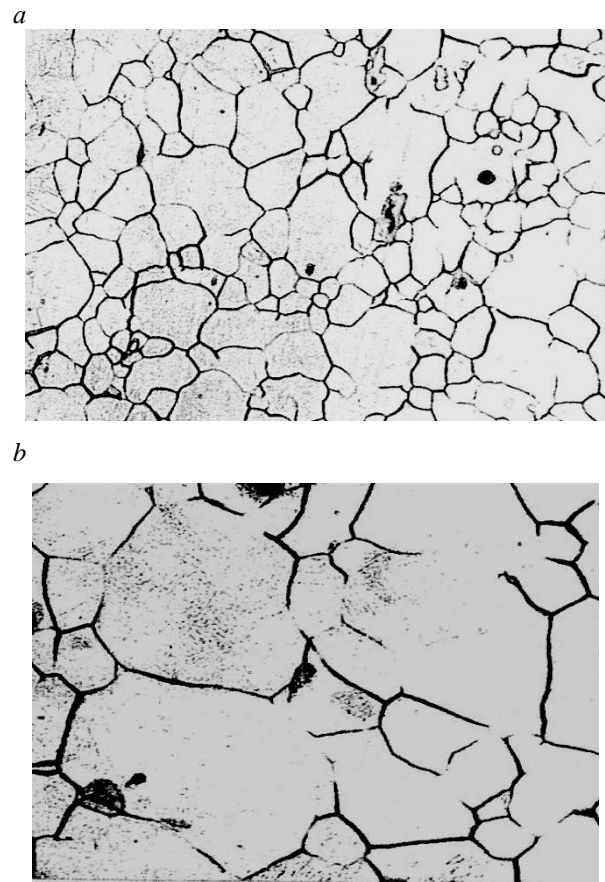


Fig. 2. The austenite structure of the steel from 0.65 % C after compression by 10 % at temperatures: *a* – 950 °C; *b* – 1100 °C. Magnification 100

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

Technologically, such an influence on the structure formation can be realized due to the gradual decrease in temperature during hot plastic deformation in case of rim formation. Indeed, after a certain deformation at the final stage of rim formation, even a slight decrease in temperature at the level of 100–150 °C of the surface layers should be sufficient to refine the austenite structure in the areas farther from the surface. This reduction in the compression temperature, providing increase in the resistance of surface layers of the rim metal, will increase the degree of hot plastic deformation of austenite in its central volumes. As a result, the central volumes of the rim will be subjected to more hot-cold work. Thus, increasing the degree of hot-cold work, accelerating the development of recrystallization processes, will lead to the formation of more uniform structure with crushed austenite grain across the rim of the solid-rolled railway wheel.

Compared with the change in the compression temperature, a certain influence on the development of crushing processes of austenite grains can be achieved by changing the scheme of metal deformation. The fact is that during hot compression of carbon steel at temperatures above A_{c3} , the ratio in the development of polygonization and recrystallization processes will determine the formation of the final austenitic structure [9, 11]. The mechanism of influence on the austenite structural changes in the case of replacement of a one-time deformation by compression in several stages (under conditions of constant total value) is actually determined by the conditions of the recrystallization center formation [1].

The critical degree of plastic deformation is the limit on the recrystallization diagram, which separates the areas with virtually absent signs of recrystallization processes from those in which a few seconds are sufficient to complete it. In this case, the rate of accumulation of defects in the crystalline structure and their location will have a decisive influence on the grain nucleation during recrystallization. Thus, in the initial stages of hot compression, when the accumulation of defects in the crystalline structure corresponds to their uniform distribution in the metal matrix, the conditions for the formation of the recrystallization nucleus will not be met [6]. In case of increasing the

deformation degree of the heterogeneity of the defects distribution and, first of all, dislocations will increase proportionally. The moment of formation of the recrystallization center corresponds to the value of hot compression, when there is a fluctuation in the dislocation distribution of the corresponding level. Thus, by subjecting carbon steel to hot compression by the values that are insufficient for the formation of the recrystallization nucleus, it becomes possible to shift the moment of development of this process towards longer exposures after deformation.

Analysis of the research results [2, 3] confirmed the possibility of improving the structural condition and the associated set of properties after hot compression of rolled carbon steels. At the temperature of hot compression of railway wheel carbon steel 1250 °C, the replacement of the deformation value of 30 % by three stages of 10 % has led to an increase in relative elongation, metal fracture energy, crack resistance by about 10–12 % [1]. The obtained result has its own explanation. Thus, given that the formation of the recrystallization nucleus of carbon steel austenite both in the process of hot compression and during exposure between the deformation stages is largely determined not so much by reducing the defect density in the crystalline structure, as their redistribution, replacement of one-time deformation by the fractional one can significantly change the conditions of this process development.

Based on the analysis of experimental data [12], it can be stated that the development of the recrystallization process «in situ» should lead to the formation of such a substructure, which after hot compression determines the influence on the final structural state of the finished product. The results of the microstructure study are given in Table 1. Analysis of the obtained austenite grain sizes shows that the peripheral metal volumes of the railway wheel rim, which are in direct contact with the deforming tool, have a slightly lower temperature compared to ones that are more distant. As a result, the state of hot-cold work will be maintained in these metal volumes for a longer period of time. In turn, this will increase the defect concentration in the crystalline structure in the austenite grains after the deformation.

Table 1

Influence of one-time and fractional compression of carbon steel at a temperature of 1250 °C

General deformation degree 30 %	Austenite grain size (μm) at a distance from the compression surface (mm)	
	10	35
one-time	110	100
fractional	54	100

This increased density of defects in the austenite structure will be an additional stimulus for the development of both dynamic in the compression process and static recrystallization during the exposure after hot compression. On the other hand, the austenitic structure of carbon steel is very sensitive to the density of crystalline defects introduced during hot plastic deformation. For example, increasing the deformation degree by approximately 1.5 times at a temperature of 1000 °C, reduces the completion time of austenite recrystallization to 10 times, from 20–30 to 3 sec [3]. Thus, in case of replacing 30 % of hot deformation with three times 10 %, the conditions for the formation of the austenite structure with smaller grains will be achieved, which will further determine the final metal structure of the railway wheel (Fig. 3). In case of increasing the distance from the compression surface, the change in the deformation scheme (single or fractional) will have a proportionally lower influence on the austenite grain size (Fig. 3, Tab. 1).

Thus, the structural changes in the railway wheel steel are largely due to the austenite structure formation during hot compression. On the other hand, additional dispersion of austenite grains can be achieved by violating the development conditions of collective recrystallization processes, changing the relationship between the degree of hot deformation, the duration of isothermal exposure, etc. [7, 14]. These provisions are explained by the competing influence on the structure formation during heating of the deformed metal material according to qualitatively different mechanisms.

Under conditions when the degree of plastic deformation is not enough to start the development of recrystallization processes, structural transformations occur due to the development of polygonization.

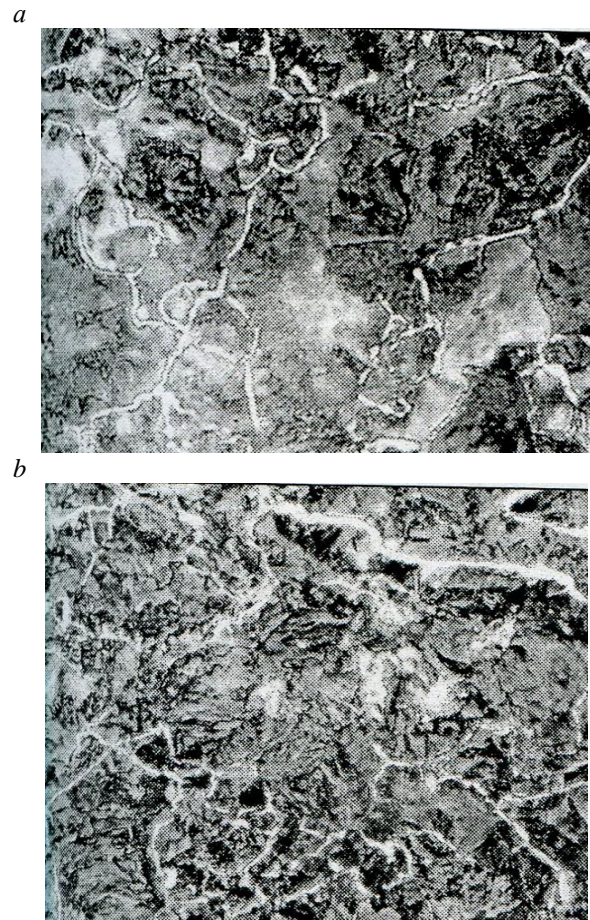


Fig. 3. Structure of railway wheel steel at a distance of 10 mm from the compression surface after one-time deformation of 30 % (a) and fractional one (b). Magnification 300

As a result, the conditions of formation of the recrystallization nucleus in the deformed metal are violated. In order to further promote the recrystallization development, it is necessary to carry out additional plastic deformation or increase the heating temperature of the deformed metal. Thus, the replacement of one-time compression by fractional one will accelerate the development of polygonization processes, which should significantly violate the formation conditions of the nucleus of recrystallized austenitic grain. The austenitic structure formed under these conditions will positively affect the final structural state of the carbon steel of the railway wheel at the final stage of thermal hardening [4, 5, 10].

Originality and practical value

Based on a study of the development of collective recrystallization processes during the hot compression of carbon steel of railway wheel, it is determined that the increase in carbon content contributes to the increase of austenite grains. After completion of hot compression of the wheel blank, the structural inhomogeneity of austenite that occurs is determined by a change in the development mechanism of recrystallization processes. In case of deformations above the critical degree, the formation and successive growth of recrystallization nuclei takes place, which leads to the structure fragmentation. At deformations below the critical value, the growth of austenite grains occurs according to the coalescence mechanism, according to which fragments of boundaries with large disorientation angles consistently disappear. In order

to refine austenite grains in the massive elements of the wheel, we offer to replace one-time hot compression by fractional one.

Conclusions

1. In case of hot compression of the railway wheel blank, increasing the carbon atoms concentration within the grade composition of steel contributes to the growth of the average austenite grain size.

2. Formation of a certain degree of structural inhomogeneity of austenite at the cross section of the rim or hub of the railway wheel is due to the dependence of the development mechanism of recrystallization processes on the deformation value.

3. Under conditions of the same degree of hot plastic deformation, the replacement of one-time compression by fractional one helps to reduce the austenite grain size.

LIST OF REFERENCE LINKS

1. Вакуленко И. А., Большаков В. И. *Морфология структуры и деформационное упрочнение стали*. Днепро : Маковецкий, 2008. 196 с.
2. Вакуленко И., Перков О., Страдомски З. Влияние температуры величины горячей деформации на размер зерна аустенита при изготовлении железнодорожных колес. Copyright by Wydawnictwo Wydziału Inżynierii Produkcji i Technologii Materiał Politechniki Czestochowskiej. *New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering : Collective monograph XVI International Scientific Conference*. Czestochowa, 2015. № 48. С. 365–368.
3. Узлов И. Г., Перков О. Н., Вакуленко И. А. Влияние схемы горячей деформации заготовки на свойства металла обода цельнокатаных железнодорожных колес. *Фундаментальные и прикладные проблемы черной металлургии*. 2002. Вып. 5. С. 196–199.
4. Шифрин М. Ю., Андреев Ю. В., Лихошвай В. А. Влияние деформации заготовки на прессах и в колесопрокатном стане на механические свойства диска и обода цельнокатаных колес. *Кузнечно-штамповочное производство*. 1970. № 8. С. 7–11.
5. Banerjee A., Hossain R., Pahlevani F., Zhu Q., Sahajwalla V. Prusty G. Strain-rate-dependent deformation behaviour of high-carbon steel in compression : mechanical and structural characterization. *Journal of Materials Science*. 2019. Vol. 54. Iss. 8. P. 6594–6607. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-018-03301-x>
6. Hossain R., Pahlevani F., Quadir M. Z. Sahajwalla V. Stability of retained austenite in high carbon steel under compressive stress : an investigation from macro to nano scale. *Scientific Reports*. 2016. Vol. 6. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep34958>
7. Hubbard D. *Plastic Deformation : Processes, Properties and Applications*. USA : Nova Science Publishers, 2016. 198 p.
8. Ławrynowicz Z. Plastic deformation and softening of the surface layer of railway wheel. *Advances in Materials Science*. 2015. Vol. 15. Iss. 4. P. 6–13. DOI: <https://doi.org/10.1515/adms-2015-0018>
9. Mirzadeh H. Constitutive modeling and prediction of hot deformation flow stress under dynamic recrystallization conditions. *Mechanics of Materials*. 2015. Vol. 85. P. 66–79. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2015.02.014>
10. Qiu C., Cookson J., Mutton P. The role of microstructure and its stability in performance of wheels in heavy haul service. *Journal of Modern Transportation*. 2017. Vol. 25. Iss. 4. P. 261–267. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-017-0143-9>

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

11. Ren X., Qi J., Gao J., Wen L., Jiang B., Chen G., Zhao H. Effects of Heating Rate on Microstructure and Fracture Toughness of Railway Wheel Steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 2016. Vol. 47. Iss. 2. P. 739–747. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-015-3264-y>
12. Shen X., Yan J., Zhang L., Gao L., Zhang J. Austenite grain size evolution in railway wheel during multi-stage forging processes. *Journal of Iron and Steel Research Internation*. 2013. Vol. 20. Iss. 3. P. 57–65. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1006-706x\(13\)60070-9](https://doi.org/10.1016/s1006-706x(13)60070-9)
13. Zhao H., Qi J., Su R., Zhang H., Chen H., Bai L., & Wang C. Hot deformation behaviour of 40CrNi steel and evaluation of different processing map construction methods. *Journal Materials Research and Technology*. 2020. Vol. 9. Iss. 3. P. 2856–2869. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.020>
14. Wang J., Xiao H., Xie H. B., Xu X. M. Simulation of Recrystallization Behavior and Austenite Grain Size Evolution during Hot Deformation of Low Carbon Steel Using the Flow Stress. *Advanced Materials Research*. 2011. Vol. 337. P. 178–183. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.337.178>

I. O. ВАКУЛЕНКО^{1*}, Д. М. БОЛОТОВА², С. В. ПРОЙДАК³, Х. АСКЕРОВ⁴, Х. КУГ⁵,
А. О. ЧАЙКОВСЬКА⁶

^{1*}Каф. «Прикладна механіка та матеріалознавство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, ел. пошта vakulenko_igor@ukr.net, ORCID 0000-0002-7353-1916

²Дніпровський ліцей залізничного транспорту, вул. Універсальна, 7, Дніпро, Україна, 49024, тел.+38 (098) 351 99 70, ел. пошта dasha.bolotova@i.ua, ORCID 0000-0001-6947-3963

³Каф. «Прикладна механіка та матеріалознавство», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, ел. пошта proyidak.sv@ukr.net, ORCID 0000-0003-2439-3657

⁴Каф. «Інженерна механіка», Карабукський університет, Карабук, Турція, 78050, тел. +90 (538) 455 04 45, ел. пошта hangardasaskerov@karabuk.edu.tr, ORCID 0000-0003-4771-3406

⁵Каф. «Інженерна механіка», Карабукський університет, Карабук, Турція, 78050, тел. +90 (544) 842 62 08, ел. пошта harun1878@gmail.com, ORCID 0000-0002-6322-4269

⁶Каф. «Матеріалознавства та обробки матеріалів», Придніпровська державна академія будівництва та архітектури, вул. Чернишевського, 24а, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (095) 618 14 63, ел. пошта chaikovska.hanna@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0001-6707-0159

ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ ПІД ЧАС ГАРЯЧОЇ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ

Мета. Основною метою роботи є визначення особливостей розвитку процесів рекристалізації аустеніту вуглецевої сталі залежно від ступеня гарячої пластичної деформації та розробка пропозицій щодо поліпшення структурного стану металу залізничного сучільнокатаного колеса. **Методика.** Як матеріал для досліджень використані дві вуглецеві сталі залізничного колеса з мінімальним і максимальним вмістом вуглецю 0,55 і 0,65 % та іншими хімічними елементами в межах марочного складу сталі 60. Зразки у вигляді циліндрів діаметром 20 мм і висотою 40 мм нагрівали в муфельній печі, витримували певний час для вирівнювання температури по перетину зразка. Після цього зразки піддавали гарячому обтискуванню на випробувальній машині типу «Інстрон». Температурний інтервал гарячого обтискування зразків складав 950–1 100 °С, за ступенів деформації по висоті в інтервалі 10–40 %. Швидкість деформації дорівнювала 10^{-3} – 10^{-2} с⁻¹. Для виявлення меж зерен аустеніту використовували стандартний травник. Структурні дослідження проводили з використанням світлового мікроскопа типу «Епіквант» за збільшень, достатніх для визначення особливостей будови зерен аустеніту. Величину розміру зерна аустеніту визначали за методиками кількісної металогрфії. **Результати.** У разі гарячого обтискування заготовки залізничного колеса збільшення концентрації атомів вуглецю лише в межах марочного складу сталі достатньо для зростання середнього розміру зерна аустеніту, що підтверджує пропозиції щодо обмеження вмісту вуглецю в металі залізничних коліс. Формування визначеного ступеня структурної неоднорідності аустеніту по перетину обода або маточини залізничного колеса обумовлене зміною механізму розвитку процесів рекристалізації залежно від величини деформації. За умов однакового ступеня гарячої пластичної деформації заміна одноразового обтискування на подрібнене супроводжується порушенням умов формування зародка рекристалізації. У результаті вказаної

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

заміни схеми гарячої пластичної деформації досягається зменшення розміру зерна аустеніту. **Наукова новизна.** На основі дослідження розвитку процесів збиральної рекристалізації під час гарячого обтискування вуглецевої сталі залізничного колеса визначено, що збільшення вмісту вуглецю сприяє збільшенню зерна аустеніту. Після завершення гарячого обтискування заготовки колеса структурна неоднорідність аустеніту, що виникає, визначається зміною механізму розвитку процесів рекристалізації. Під час деформацій вище критичного ступеня відбувається формування й послідовне зростання зародків рекристалізації, що призводить до подрібнення структури. У разі деформацій нижче критичного значення зростання зерен аустеніту відбувається за механізмом коалесценції, за яким послідовно зникають фрагменти меж із великими кутами дезорієнтації. **Практична значимість.** Для подрібнення зерен аустеніту в масивних елементах залізничного суцільнокатаного колеса пропонуємо заміну одноразового гарячого обтискування на подрібнене.

Ключові слова: аустеніт; деформація; температура; розмір зерна; вуглецева сталь; залізничне колесо

И. А. ВАКУЛЕНКО^{1*}, Д. М. БОЛОТОВА², С. В. ПРОЙДАК³, Х. АСКЕРОВ⁴, Х. КУГ⁵, А. О. ЧАЙКОВСКАЯ⁶

^{1*}Каф. «Прикладная механика и материаловедение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, эл. почта vakulenko_ihor@ukr.net, ORCID 0000-0002-7353-1916

²Днепропетровский лицей железнодорожного транспорта, ул. Универсальная, 7, Днепро, Украина, 49024, тел. +38 (098) 351 99 70, эл. почта dasha.bolotova@i.ua, ORCID 0000-0001-6947-3963

³Каф. «Прикладная механика и материаловедение», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 56, эл. почта proidak.sv@ukr.net, ORCID 0000-0003-2439-3657

⁴Каф. «Инженерная механика», Карабукский университет, Катабук, Турция, 78050, тел. +90 (538) 455 04 45, эл. почта hangardasaskerov@karabuk.edu.tr, ORCID 0000-0003-4771-3406

⁵Каф. «Инженерная механика», Карабукский университет, Катабук, Турция, 78050, тел. +90 (544) 842 62 08, эл. почта hagnun1878@gmail.com, ORCID 0000-0002-6322-4269

⁶Каф. «Материаловедения и обработки материалов», Приднепровская государственная академия строительства и архитектуры, ул. Чернышевского, 24а, Днепро, Украина, 49005, тел. +38 (095) 618 14 63, эл. почта chaikovska.hanna@pgasa.dp.ua, ORCID 0000-0001-6707-0159

ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Цель. Основной целью работы является определение особенностей развития процессов рекристаллизации аустенита углеродистой стали в зависимости от степени горячей пластической деформации и разработка предложений по улучшению структурного состояния металла железнодорожных цельнокатаных колес. **Методика.** В качестве материала для исследований использованы две углеродистые стали железнодорожных колес с минимальным и максимальным содержанием углерода 0,55 и 0,65 %, и другими химическими элементами в пределах марочного состава стали 60. Образцы в виде цилиндров диаметром 20 мм и высотой 40 мм нагревали в муфельной печи, выдерживали требуемое время для выравнивания температуры по сечению образца. После этого образцы подвергались горячему обжатию на испытательной машине типа «Инстрон». Температурный интервал горячего обжатия образцов составлял 950–1100 °С, при степенях деформации по высоте в интервале 10–40 %. Скорость деформации составляла 10^{-3} – 10^{-2} с⁻¹. Для выявления границ зерен аустенита использован стандартный травитель. Исследования структуры осуществляли с использованием светового микроскопа типа «Епиквант» при увеличениях, достаточных для определения особенностей строения зерен аустенита. Величину размера зерна аустенита определяли с использованием методик количественной металлографии. **Результаты.** При горячем обжатии заготовки железнодорожного колеса увеличения концентрации атомов углерода только в пределах марочного состава стали достаточно для роста среднего размера зерна аустенита, что подтверждает предложения по ограничению содержания углерода в металле железнодорожных колес. Формирование определенной степени структурной неоднородности аустенита по сечению обода или ступицы железнодорожного колеса обусловлено изменением механизма развития процессов рекристаллизации в зависимости от величины деформации. В условиях одинаковой степени горячей пластической деформации замена одноразового обжатия на дробное сопровождается

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

нарушением условий формирования зародыша рекристаллизации. В результате указанной замены схемы горячей пластической деформации достигается уменьшение размера зерна аустенита. **Научная новизна.** На основе исследования развития процессов собирательной рекристаллизации во время горячего обжата углеродистой стали железнодорожного колеса определено, что увеличение содержания углерода способствует приросту размера зерна аустенита. После завершения горячего обжата заготовки колеса возникающая структурная неоднородность аустенита объясняется изменением механизма развития процессов рекристаллизации. При деформациях выше критической степени происходит формирование и последовательный рост зародышей рекристаллизации, приводя к измельчению структуры. При деформациях ниже критического значения рост зерен аустенита происходит по механизму коалесценции, по которому последовательно исчезают фрагменты границ с большими углами разориентации. **Практическая значимость.** Для измельчения зерен аустенита в массивных элементах железнодорожного цельнокатаного колеса предлагаем замену одно-разового горячего обжата на дробное.

Ключевые слова: аустенит; деформация; температура; размер зерна; углеродистая сталь; железнодорожное колесо

REFERENCES

1. Vakulenko, I. A., & Bolshakov, V. I. (2008). *Morfologiya struktury i deformatsionnoe uprochnenie stali*. Dnepropetrovsk: Makovetskiy Y. V. (in Russian)
2. Vakulenko, I., Perkov, O., & Stradomski, Z. (2015). Influence of Temperature and Value of Hot Deformation on Size of Grain in Austenite at Making of Railway Wheels. Copyright by Wydawnictwo Wydziału Inżynierii Produkcji i Technologii Materialow Politechniki Czestochowskiej. *New technologies and achievements in metallurgy, material engineering and production engineering: Collective monograph XVI International Scientific Conference. Czestochowa*, 48, 365-368. (in Russian)
3. Uzlov, I. G., Perkov, O. N., & Vakulenko, I. A. (2002). Vliyanie skhemy goryachey deformatsii zagotovki na svoystva metalla oboda tselnokatanykh zheleznodorozhnykh koles. *Fundamentalnye i prikladnye problemy chernoy metallurgii*, 5, 196-199. (in Russian)
4. Shifrin, M. Yu., Andreev, Yu. V., & Likhoshvayj, V. A. (1970). Vliyanie deformatsii zagotovki na pressakh i v kolesoprokatnom stane na mekhanicheskie svoystva diska i oboda tselnokatanykh koles. *Kuznechno-shtampovoechnoe proizvodstvo*, 8, 7-11. (in Russian)
5. Banerjee, A., Hossain, R., Pahlevani, F., Zhu Q., Sahajwalla V., & Prusty G. (2019). Strain-rate-dependent deformation behaviour of high-carbon steel in compression: mechanical and structural characterization. *Journal of Materials Science*, 54(8), 6594-6607. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10853-018-03301-x> (in English)
6. Hossain, R., Pahlevani, F., Quadir, M. Z., & Sahajwalla, V. (2016). Stability of retained austenite in high carbon steel under compressive stress: an investigation from macro to nano scale. *Scientific Reports*, 6, 1-11. DOI: <https://doi.org/10.1038/srep34958> (in English)
7. Hubbard, D. (2016). *Plastic Deformation: Processes, Properties and Applications*. USA: Nova Science Publishers. (in English)
8. Ławrynowicz, Z. (2015). Plastic deformation and softening of the surface layer of railway wheel. *Advances in Materials Science*, 15(4), 6-13. DOI: <https://doi.org/10.1515/adms-2015-0018> (in English)
9. Mirzadeh, H. (2015). Constitutive modeling and prediction of hot deformation flow stress under dynamic recrystallization conditions. *Mechanics of Materials*, 85, 66-79. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechmat.2015.02.014> (in English)
10. Qiu, C., Cookson, J., & Mutton, P. (2017). The role of microstructure and its stability in performance of wheels in heavy haul service. *Journal of Modern Transportation*, 25(4), 261-267. DOI: <https://doi.org/10.1007/s40534-017-0143-9> (in English)
11. Ren, X., Qi, J., Gao, J., Wen, L., Jiang, B., Chen, G., & Zhao, H. (2016). Effects of Heating Rate on Microstructure and Fracture Toughness of Railway Wheel Steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 47(2), 739-747. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11661-015-3264-y> (in English)
12. Shen, X., Yan, J., Zhang, L., Gao, L., & Zhang, J. (2013). Austenite grain size evolution in railway wheel during multi-stage forging processes. *Journal of Iron and Steel Research International*, 20(3), 57-65. DOI: [https://doi.org/10.1016/s1006-706x\(13\)60070-9](https://doi.org/10.1016/s1006-706x(13)60070-9) (in English)

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

13. Zhao, H., Qi, J., Su, R., Zhang, H., Chen, H., Bai, L., & Wang, C. (2020). Hot deformation behaviour of 40CrNi steel and evaluation of different processing map construction methods. *Journal Materials Research and Technology*, 9(3), 2856-2869. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.01.020> (in English)
14. Wang, J., Xiao, H., Xie, H. B., & Xu, X. M. (2011). Simulation of Recrystallization Behavior and Austenite Grain Size Evolution during Hot Deformation of Low Carbon Steel Using the Flow Stress. *Advanced Materials Research*, 337, 178-183. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.337.178> (in English)

Received: January 21, 2020

Accepted: May 25, 2020

МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 621.434

П. М. ГАЩУК¹, С. В. НІКІПЧУК^{2*}

¹Каф. «Експлуатація транспортних засобів та пожежно-рятувальної техніки», Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, вул. Клепарівська, 35, Львів, Україна, 79007, тел. +38 (067) 476 84 83, ел. пошта petroh@meta.ua, ORCID 0000-0002-2345-4879

^{2*}Каф. «Експлуатація та ремонт автомобільної техніки», Національний університет «Львівська політехніка», вул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79013, тел. +38 (097) 217 23 15, ел. пошта nikipch@gmail.com, ORCID 0000-0003-2499-9990

ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОЧИХ ЦИКЛІВ ДВИГУНА ШВИДКОГО ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ З ПОДОВЖЕНИМ РОБОЧИМ ХОДОМ

Мета. Ми передбачаємо в найбільш загальних термінах дослідити ефективність робочих циклів двигуна швидкого внутрішнього згоряння з подовженим робочим ходом. Подовження робочого ходу передбачено, наприклад, у так званих двигунах Аткінсона й Міллера, які як більш досконалі протиставляють традиційному двигуну Отто. **Методика.** Різні робочі цикли задля виявлення їх суто принципів особливостей, розглянуто в ідеалізованому вигляді із застосуванням понять умовної роботи циклу, кількісної та якісної характеристик робочого тіла. **Результати.** З'ясовано, зокрема, таке: 1) щоб двигун Аткінсона–Міллера виконував однакову роботу з двигуном Отто, він повинен мати помітно більший робочий об'єм; 2) у разі наперед заданої механічної роботи коефіцієнт корисної дії й хід розширення циклу Аткінсона–Міллера зростають, аж поки він не перетворюється на цикл Гамфрі; 3) підвищення засобами Аткінсона ефективності двигуна Отто супроводжується тим більшим зростанням робочого об'єму, чим ефективнішим є двигун від самого початку. **Наукова новизна.** Доведено, що за часткових навантажень двигун Аткінсона може істотно втрачати свою енергетичну ефективність. До того ж, якщо в процесі віртуального конструювання двигуна Аткінсона стають помітними енергоощадні переваги циклу Гамфрі, то в процесі уявного регулювання тяги синтезованого двигуна такого кшталту переваги цього циклу вже не простежуються. **Практична значимість.** Загалом існують підстави стверджувати, що двигун Отто – це все-таки вигідний технічний компроміс між двотактним двигуном і двигуном Аткінсона. З одного боку, зростання коефіцієнта корисної дії двигуна швидкого внутрішнього згоряння сприяє істотному заощадженню пального та зниженню загроз довіллію упродовж життєвого циклу машини з приводом від такого енергоощадного двигуна. А з другого боку, втілення енергоощадного робочого циклу Аткінсона–Міллера супроводжуватиметься зростанням масогабаритних розмірів двигуна й негативно позначатиметься на властивостях машини.

Ключові слова: двигун швидкого внутрішнього згоряння; подовжений робочий хід; робочий цикл; двигун Аткінсона–Міллера; двигун Отто; енергетична ефективність; коефіцієнт корисної дії

Вступ

У наш час енергетичну ефективність та екологічність машин будь-якого призначення співвідносять вельми критично. Наприклад, дизельний двигун ще відносно недавно значною мірою сприймали як досконалу теплову машину, оскільки йому серед інших теплових машин потенційно притаманний більший коефіцієнт

корисної дії. Хоча очевидно, що дизель – це теплова машина повільного внутрішнього згоряння, що не є ознакою енергетичної досконалості. Високий ступінь стиснення пальної суміші, звісно, сприяв підвищенню коефіцієнта корисної дії дизеля, але при цьому погіршував масогабаритні критерії досконалості. Та найважливіше, що ще й не видно було достатньо чіт-

МАШИНОБУДУВАННЯ

ких орієнтирів щодо його екологічного вдосконалення. Тож дизельний двигун у приводі мобільної машини, перш за все через екологічні недоліки, поступився місцем двигуну швидкого внутрішнього згоряння. І зараз навіть не дуже цікаво з'ясувати, що стало визначальним: тип і властивості пального чи принцип роботи й будова двигуна.

Проблемним з огляду на екологію є вимушене використання карбоновмісних енергоносіїв. Тож і швидке внутрішнє згоряння аж ніяк не вичерпує екологічну проблему. Одним із засобів істотного підвищення ефективності класичного двигуна швидкого внутрішнього згоряння (двигуна Ніколауса–Августа Отто, Nikolaus–August Otto Engine), як вважають, є подовження робочого ходу (процесу розширення робочого тіла). Саме таке вдосконалення втілено в двигунах Джеймса Аткинсона (James Atkinson Engine) [5, 6] і Ральфа Міллера (Ralph Miller Engine) [38–40].

Установлено, що цикл із подовженим робочим ходом (цикл із подовженим процесом розширення, який називатимемо циклом Аткинсона–Міллера), поза всяким сумнівом, сприяє підвищенню енергетичної ефективності двигуна, але ціною зменшення середнього індикаторного тиску й потужності [31]. Ефективність цього циклу ретельно вивчали стосовно двигуна Отто [17, 29] двигуна Дизеля [9, 18, 19], обох паралельно [35, 41, 45], у випадку застосування нетрадиційного й альтернативного палива [28, 30, 36], у системі гібридного приводу [32]. Усі ці дослідження є цінним внеском у скарбничку знань про потенційні можливості вдосконалення теплових двигунів. Це стосується й результатів дослідження ефективності навіть дизельних двигунів [7, 8, 42], які тепер практично не визнають перспективними, оскільки ці результати в певних аспектах можна перенести на інші типи двигунів, яким поки що не відмовлено у визнанні перспективності застосування.

Цикл Аткинсона–Міллера в різних стратегіях реалізації все більше й більше привертає увагу розробників двигунів з іскровим запаленням для транспортних засобів [17, 29, 44]. Це стосується й стаціонарного енергопостачання [21, 37]. У роботі [37] оцінено потенційні вигоди від застосування концепції Міллера в мало-

му газовому двигуні, призначеному, наприклад, для місцевого комбінованого продукування і тепла, і механічної енергії. З'ясувалося, що цикл Міллера порівняно з традиційним циклом Отто сприяє заощадженню палива на рівні 5...10 %, але із супутньою втратою потужності. Більші механічні втрати при цьому будуть переважені енергоощадністю. Актуальним є також дослідження шуму/вібрації та довговічності. Когенерацію енергії газовими двигунами на основі концепції Міллера визнають ефективною й вигідною також у більших масштабах [21]. Поряд із газовим вигідним можна вважати запровадження робочого циклу Міллера також і в звичному бензиновому двигуні [27, 46]. Але прийнятність концепції Міллера залежатиме від того, чи прийнятними будуть втрати потужності.

У значній мірі стратегія втілення принципу Міллера визначається властивостями системи керування газорозподілом [13–15]. Тож інколи співвідносять різні варіанти саме керування клапанами механізму газорозподілу і організації циклу Міллера з метою розпізнати кращий [43].

Особливе значення мають дослідження теоретичного спрямування [20, 23, 48]. За приклад раціонально систематизованого аналізу можуть правити роботи [20, 23], у яких цикл Мюллера моделюють у термінах [4] обмежених у часі термодинамічних процесів. При цьому співвідносять енергетичну ефективність та енергетичну продуктивність. Теоретичні узагальнення містять також роботи [25, 26, 47]. Високим рівнем теоретичності відзначаються й дослідження [11, 34], у яких беруть до уваги необоротність циклів, ентропійність явища перетворення теплоти на роботу, температурну залежність теплоємності робочої субстанції.

Проблема вдосконалення теплового двигуна є багатоаспектною. Власне, різні аспекти вдосконалення теплового двигуна стали предметом ретельного дослідження, наприклад, у роботах [2, 3, 16, 22, 24]. Але доцільним було б розглянути концепцію подовженого робочого ходу насамперед у більш загальних термінах, зберігаючи наочність аналітичних міркувань.

МАШИНОБУДУВАННЯ

Мета

З огляду на викладене мета статті – формалізовано оцінити потенційну ефективність технології зменшення відношення ходу стискання пальної суміші до робочого ходу поршня у двигуні швидкого внутрішнього згорання.

Методика

У процесі аналізу доречно було б зважати на енергетичну ефективність двигуна (вимірювану коефіцієнтом корисної дії), на можливу зміну його маси й габаритів, на здатність сприймати навантаження та на можливості змінювати режими роботи за потреби. При цьому доцільно використовувати найбільш загальні теоретичні поняття, що не містять надто конкретної інформації та не обтяжують суть справи побічними ефектами. Двигун Міллера за технічними проявами близький до двигуна Аткинсона, і тому є підстави знайти спосіб протиставляти їх разом як один об'єкт традиційному двигуну Ніколауса–Августа Отто. За взірць підходу до загального аналізу властивостей теплової машини могла би правити логіка Саді Карно (Saadi Carnot) [10], яка, щоправда, стосується віртуальної так званої двотемпературної теплової машини (паливний елемент, на противагу їй, зазначмо, називають одотемпературною машиною). Але цілком продуктивним міг би стати аналіз, що спирається й на інші ідеальні термодинамічні цикли з нескінченною тривалістю [1].

Розгляньмо окремі варіації термодинамічного циклу Отто, рис. 1 (p_0 – тиск у довкіллі). У звичайному циклі Отто $r-a-c-z-b-a-r$ (рис. 1, *a*) ділянки $r-a$ та $a-r$ імітують відповідно такт впускання пальної суміші в робочий простір і такт випускання відпрацьованих газів з нього, а ділянка $c-z$ – процес згорання суміші (процес теплотворення). У 1947 році американський інженер Ральф Міллер запропонував зробити такт стиснення в класичному двигуні Отто механічно коротшим за такт робочого ходу (за такт розширення), рис. 1, *б*: у робочому тепловому циклі Міллера (Miller Cycle) $r-r'-a'-c'-z-b-a-r$ точка r' відповідає моменту закриття впускного клапана; такт стискання робочого тіла (ідеального газу) фор-

мально відображає ділянка $r'-c'$ циклу, яка за переміщенням поршня справді є коротшою за ділянку $z-b$ розширення (p'_0 – тиск у циліндрі в кінці ходу поршня до нижнього мертвого положення на такті всмоктування). Того самого результату можна досягнути, закриваючи впускний клапан після НМП із великим запізненням, виштовхуючи при цьому частину пальної суміші назад у впускний колектор, рис. 1, *в*: у робочому циклі $r-a-r'-c'-z-b-a-r$ власне процес впускання пальної суміші формально імітує ділянка $r-r'$.

Впускний клапан, зрештою, можна відкривати також із запізненням, рис. 1, *г*: у циклі $r-r''-a'-c'-z-b-a-r$ ділянка $r''-a'$ імітує власне процес впускання; площа фігури $a-r'-c'-z-b-a$ відповідає додатній роботі циклу, а площа фігури $r-r''-a'-r'-r$ – від'ємній роботі. Зауважмо, на наведених діаграмах ділянка розширення $z-b$ розташована довільно, без урахування пропорцій між кількостями спожитої суміші й показниками її якості.

Загалом циклові Міллера (рис. 1, *б* і *в*) можна поставити у відповідність теоретичний цикл $r'-c'-z-b-a-r'$ (рис. 2). У такому разі цикл Міллера (див. рис. 2) можна беззастережно трактувати як ще один важливий елементарний термодинамічний поряд зі звичними елементарними термодинамічними циклами [1] Карно, Отто, Брайтона, Дизеля, Ериксона, Сабате, Стирлінга. Хоча, з іншого боку, він є ніби похідним від циклу Отто, є його варіацією.

Двигун Міллера за технічними проявами близький до так званого двигуна Аткинсона, рис. 3: цикл роботи двигуна Аткинсона ідеалізує та сама, зображена на рис. 2, діаграма, що й цикл Міллера. Тут також стиск є «коротшим» за розширення, але цього разу завдяки особливому триланковому хитневому механізмові. Можна казати, що двигун Міллера – це примітивізоване поєднання двигунів Аткинсона й Отто. Але двигун Аткинсона в разі варіації його схемних параметрів (рис. 4) потенційно здатен реалізувати і структурно складніший робочий цикл – із двома парами мертвих положень поршня.

МАШИНОБУДУВАННЯ

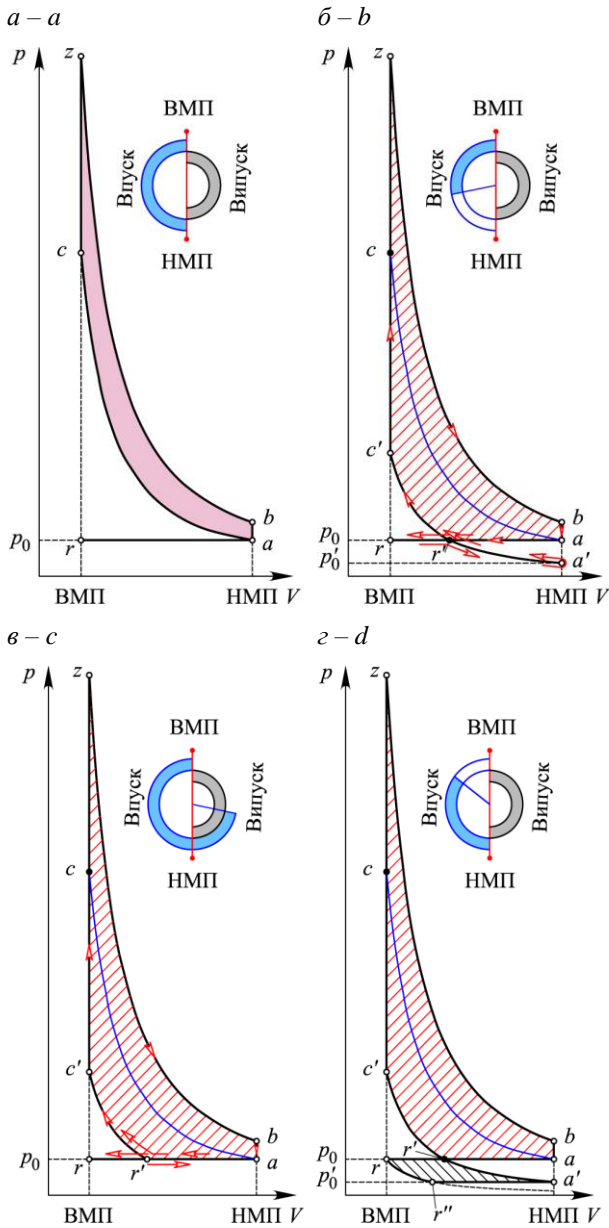


Рис. 1. Варіації циклу Отто

Fig. 1. Otto cycle variations

Якщо двигуни Отто й Міллера чотири такти свого робочого циклу здійснюють за два оберти колінчастого вала, то традиційний двигун Аткинсона реалізує свій робочий цикл лише за один оберт вала (подібно до того, як двотактний (двостадійний) двигун утілює свій двотактний робочий цикл також за один оберт вала). Це дозволяє (рис. 4) застосувати безпосередній (безредукторний) привід газорозподільного ме-

ханізму. Щоправда, схему двигуна можна істотно модифікувати (рис. 5), відводячи під робочий цикл усе-таки два оберти вала.

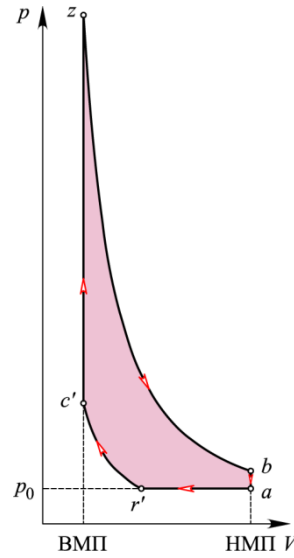


Рис. 2. Цикл Аткинсона–Міллера

Fig. 2. Atkinson/Miller cycle

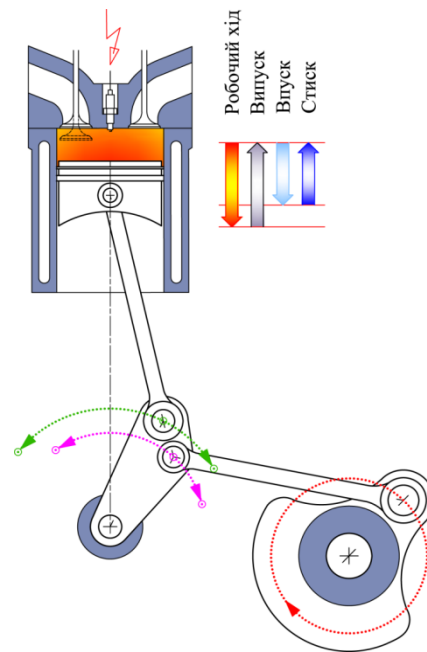


Рис. 3. Схема простого хитового механізму двигуна Аткинсона

Fig. 3. Scheme of a simple connecting rod gear of Atkinson engine

МАШИНОБУДУВАННЯ

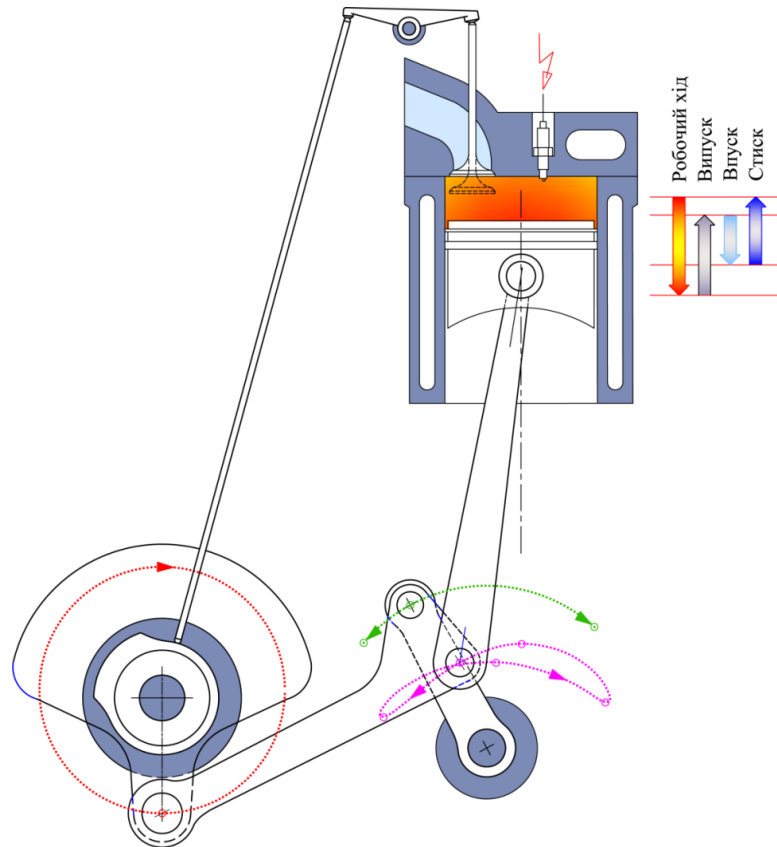


Рис. 4. Схема хитневого механізму з двома верхніми та двома нижніми мертвими положеннями

Fig. 4. Scheme of the connecting rod gear with two upper and two lower dead center positions

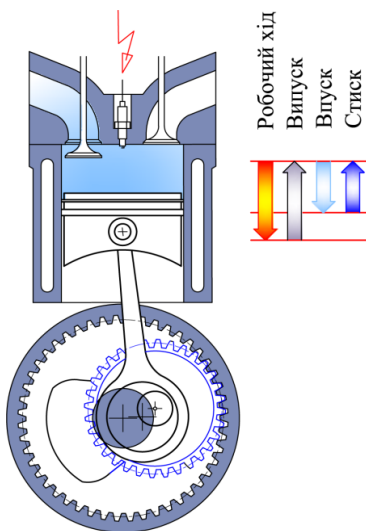


Рис. 5. Схема планетарно-зубчастого хитневого механізму двигуна Аткинсона

Fig. 5. Scheme of planetary gear mechanism of Atkinson engine

Зауважмо, двигун Аткинсона запатентовано англійським інженером Джеймсом Аткинсоном ще в 1886 році [5], щоб оминати, як стверджують, перепони патенту Ніколауса Отто. Та все ж він не набув практичного визнання, а от до двигуна Міллера ставлення практиків виявилось більш доброзичливим.

Результати

Ефективність швидкого теплотворення. Хай задано теоретичний цикл Отто $1-2-3-4-1$, який складають дві ізохори і дві адіабати (ізоентропи), рис. 6 (v_1 і v_2 – питомі об'єми робочого простору й камери згоряння). Робочим тілом є ідеальний газ, стан якого визначає рівняння $p\nu = RT$ (p – тиск у робочому просторі, ν – питомий об'єм газу, T – абсолютна температура газу, R – газова стала). До одиниці маси робочого тіла ізохорно підводиться (питома) теплота

МАШИНОБУДУВАННЯ

$$q = q_v = c_v(T_3 - T_2), \quad (1)$$

де c_v – незмінна питома теплоємність робочого тіла за сталого об'єму; T_m і p_m – температура й тиск, відповідні точці m циклу. Цю ж кількість теплоти можна підвести спочатку частиною $q'_v < q$ ізохорно, а потім частиною $q'_p = q - q'_v$ ізобарно:

$$q = q'_v + q'_p = c_v(T_{3'} - T_2) + c_p(T_{3'} - T_{3'}), \quad (2)$$

де c_p – незмінна питома теплоємність робочого тіла за сталого тиску.

Прирівняємо (1) і (2):

$$c_v(T_3 - T_2) = c_v(T_{3'} - T_2) + c_p(T_{3'} - T_{3'}),$$

звідки (перемножуючи ліву та праву частини цієї рівності на R , беручи до уваги рівняння стану та позначаючи $c_p / c_v = k$ – показник адиабати) знайдемо:

$$\frac{v_{3''}}{v_2} = \frac{1}{k} \frac{p_3}{p_{3'}} + \frac{k-1}{k}.$$

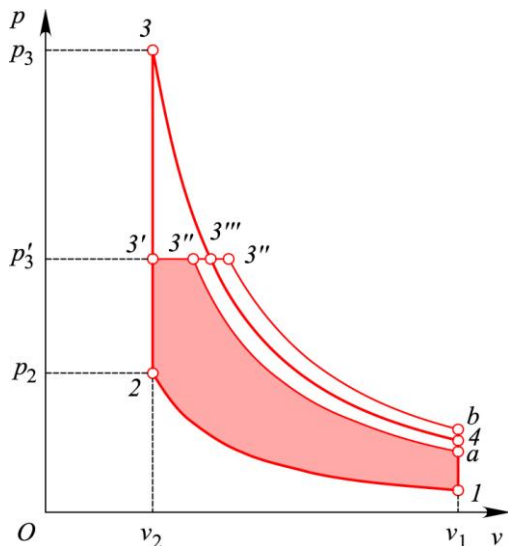


Рис. 6. Порівняння циклів з ізохорним та ізохорно-ізобарним підведеннями теплоти до робочого тіла

Fig. 6. Comparison of cycles with isochoric and isochoric-isobaric heat supply to the working fluid

Ізобара $3' - 3''$ ($p = p_{3'} = \text{const}$) гіпотетично може не перетинати адиабату $3 - 4$ (як, наприклад, у разі циклу $1 - 2 - 3' - 3'' - a - 1$), а може перетнути її в точці $3'''$ (як, наприклад, у разі циклу $1 - 2 - 3' - 3'' - b - 1$), якій відповідає рівність (рис. 6):

$$\frac{v_{3''}}{v_2} = \left(\frac{p_3}{p_{3'}} \right)^{1/k}.$$

У першому випадку (коли $v_{3''} \leq v_{3''}$) виділена на рис. 6 площа, що характеризує механічну роботу циклу зі змішаним підведенням теплоти, очевидно, менша за площу фігури $1 - 2 - 3 - 4 - 1$, що характеризує механічну роботу циклу з ізохорним підведенням теплоти. Це означає, що класичний цикл Отто досконаліший за його ізобарну варіацію. Але й у другому випадку (коли $v_{3''} > v_{3''}$) цей цикл залишається також досконалішим: в ізохорному процесі $4' - 1$ відводиться в довкілля більше теплоти, ніж в ізохорному процесі $4 - 1$.

Тож ізохорне підведення теплоти до робочого тіла ефективніше за ізохорно-ізобарне. Це теоретична вказівка на те, що вся теплота повинна надійти в робочий простір двигуна відразу з початком такту робочого ходу і що досконалішим є двигун саме швидкого внутрішнього згоряння. Відтак достатньо надійне втілення принципу НССІ-двигуна (Homogeneous Charge Compression Ignition Engine; двигуна з об'ємним згорянням) слід було б сприймати як істотне досягнення [12, 33].

Порівняння ефективності циклів Отто й Аткинсона-Міллера. Змітуймо перетворення циклу Отто $1 - 2 - 3 - 4 - 1$ на цикл Аткинсона (Міллера) $1' - 2' - 3' - 4' - 1' - 1'$, рис. 7. Хай ідеться про номінальний режим роботи двигуна, коли енергоємність робочої суміші (робочого тіла) є максимально можливою. Тож вважатимемо, що масу m робочої суміші, яка потрапляє в робочий простір двигуна Отто, і масу m' робочої суміші, яка потрапляє в робочий простір двигуна Аткинсона (Міллера) на номінальному режимі, співвідносять як відповідні їм об'єми V_1 і V_1' (залишки відпрацьованого робочого тіла від попереднього циклу в камері згоряння до уваги не беруться):

МАШИНОБУДУВАННЯ

$$\frac{m}{m'} = \frac{V_1}{V_1'} = \varepsilon_v. \quad (3)$$

Якщо ступінь стискування пальної суміші у двигуні Отто становив ε , то логічно зберегти його значення й у двигуні Аткинсона:

$$\frac{V_1'}{V_2'} = \frac{V_1}{V_2} = \varepsilon. \quad (4)$$

Ізоентропам $1'-2'$ і $1-2$ відповідають співвідношення:

$$\frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2}\right)^k = \varepsilon^k; \quad \text{і} \quad \frac{p_2'}{p_1'} = \left(\frac{V_1'}{V_2'}\right)^k = \varepsilon^k.$$

Тож оскільки $p_1' = p_1 = p_0$ (p_0 — тиск у до-вкільлі), то й $p_2' = p_2$.

До робочих тіл у циклах підводяться тепло-ти

$$\begin{aligned} Q_1 &= mc_v(T_3 - T_2) = \frac{c_v}{R}(p_3V_3 - p_2V_2) = \\ &= \frac{c_v}{R}V_2(p_3 - p_2); \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} Q_1' &= m'c_v(T_3' - T_2') = \frac{c_v}{R}(p_3'V_3' - p_2'V_2') = \\ &= \frac{c_v}{R}V_2'(p_3' - p_2'). \quad (5) \end{aligned}$$

Тут узято до уваги відповідні рівняння стану $pV = mRT$ і $pV = m'RT$. Є сенс вважати, що

$$\frac{Q_1'}{Q_1} = \frac{V_2'(p_3' - p_2')}{V_2(p_3 - p_2)} = \frac{m'}{m} = \frac{V_1'}{V_1}.$$

Тож оскільки $p_2' = p_2$, то й $p_3' = p_3$, див. (4) і рис. 7. Позначимо $p_3/p_2 = \lambda$.

Величина ε_v (див. (3) і рис. 7) у разі незмінності параметра V_1 може збільшуватись від значення $\varepsilon_v = 1$ (що відповідає двигуну Отто) до значення

$$\varepsilon_v = V_1/V_1'' = (p_3/p_2)^{1/k} = \lambda^{1/k}$$

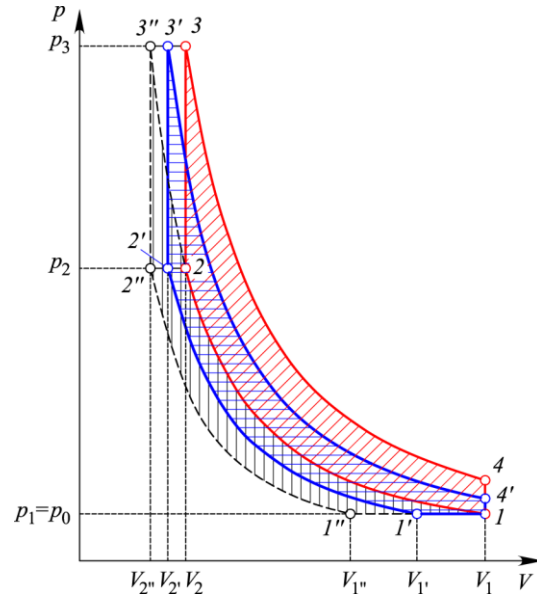


Рис. 7. Порівняння циклів Отто й Аткинсона

Fig. 7. Comparison of Otto and Atkinson cycles

(що відповідає циклові $1''-2''-3''-2-1-1''$, властивому газотурбінному двигуну).

Тож у циклі Аткинсона впродовж ізохорного процесу $2'-3'$ підводиться теплота (див. (5)):

$$\begin{aligned} Q_1' &= m'c_v(T_3' - T_2') = m'c_vT_1'\varepsilon^{k-1}\left(\frac{p_3'}{p_2'} - 1\right) = \\ &= m'c_vT_1'\varepsilon^{k-1}\left(\frac{p_3}{p_2} - 1\right) = m'c_vT_1'\varepsilon^{k-1}(\lambda - 1), \quad (6) \end{aligned}$$

тут узято до уваги співвідношення:

$$\frac{T_3'}{T_2'} = \frac{p_3'}{p_2'}, \quad \frac{T_2'}{T_1'} = \left(\frac{V_1'}{V_2'}\right)^{k-1} = \varepsilon^{k-1}; \quad \frac{p_3'}{p_2'} = \frac{p_3}{p_2} = \lambda.$$

Натомість в ізохорно-ізобарному процесі $4'-1-1'$ відводиться теплота:

$$\begin{aligned} Q_2' &= m'(c_v(T_4' - T_1) + c_p(T_1 - T_1')) = \\ &= m'c_vT_1'\left(\frac{T_1}{T_1'}\left(\frac{T_4'}{T_1} - 1\right) + k\left(\frac{T_1}{T_1'} - 1\right)\right) = \\ &= m'c_vT_1'\left(\varepsilon_v\left(\frac{\lambda}{\varepsilon_v^k} - 1\right) + k(\varepsilon_v - 1)\right). \quad (7) \end{aligned}$$

МАШИНОБУДУВАННЯ

Тут узято до уваги співвідношення:

$$\frac{c_p}{c_v} = k; \quad \frac{T_1}{T_1'} = \frac{V_1}{V_1'} = \varepsilon_v; \quad \frac{T_4'}{T_1} = \frac{p_4'}{p_1};$$

$$\frac{p_4'}{p_3'} = \frac{p_4'}{p_3} = \left(\frac{V_3'}{V_4'}\right)^k = \left(\frac{V_2' V_1'}{V_1' V_1}\right)^k = \frac{1}{(\varepsilon \varepsilon_v)^k};$$

$$\frac{p_2}{p_1} = \varepsilon^k; \quad \frac{p_4'}{p_1} = \frac{\lambda}{\varepsilon_v^k}.$$

На підставі (6) і (7) корисну дію циклу Аткінсона визначатиме коефіцієнт:

$$\eta_t' = \frac{Q_1' - Q_2'}{Q_1'} = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \frac{\varepsilon_v \left(\frac{\lambda}{\varepsilon_v^k} - 1 \right) + k(\varepsilon_v - 1)}{\lambda - 1}. \quad (8)$$

При цьому:

$$\frac{\partial \eta_t'}{\partial \varepsilon_v} = \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \frac{k-1}{\lambda-1} \left(\frac{\lambda}{\varepsilon_v^k} - 1 \right) \geq 0;$$

$$\frac{\partial^2 \eta_t'}{\partial \varepsilon_v^2} = -\frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \frac{1}{\varepsilon_v^{k+1}} \frac{\lambda k(k-1)}{\lambda-1} < 0 \quad (9)$$

(згадаймо: $1 \leq \varepsilon_v^k \leq \lambda$). Отже, залежність $\eta_t' = \eta_t'(\varepsilon_v)$ є монотонно зростаючою й опуклою дотори (її підграфік є опуклою фігурою). Натомість корисну дію циклу Отто визначає коефіцієнт:

$$\eta_t' = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}. \quad (10)$$

Зауважимо, що цикл, який складають адіабатне (ізоентропне) стискання, ізохорне нагрівання (унаслідок спалювання палива в замкненому об'ємі), адіабатне (ізоентропне) розширення, ізобарне охолодження, називають циклом Гамфрі (Humphrey Cycle). За його допомогою ідеалізовано описують робочий процес клапанного пульсуючого повітряно-реактивного двигуна.

Отож у разі $\varepsilon_v^k = \lambda$ цикл Аткінсона вироджується у так званий «газотурбінний» цикл (цикл Гамфрі), для якого (див. (8), (9)):

$$\eta_t' = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \frac{k(\lambda^{1/k} - 1)}{\lambda - 1}; \quad \frac{\partial \eta_t'}{\partial \varepsilon_v} = 0,$$

а в разі $\varepsilon_v = 1$ збігається з циклом Отто, для якого

$$\eta_t' = \eta_t = 1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}}.$$

Робоче тіло в циклі Отто, який узято за основу, виконує роботу:

$$W = Q_1 \eta_t = \frac{c_v V_1}{R \varepsilon} (p_3 - p_2) \eta_t =$$

$$= \frac{c_v V_1}{R \varepsilon} (p_3 - p_2) \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \right). \quad (11)$$

Робота ж меншої кількості робочого тіла в циклі Аткінсона, похідному від циклу Отто, звісно, буде меншою $W' < W$. Щоб ці роботи стали однаковими, потрібно синтезувати новий цикл Аткінсона зі збільшеним робочим об'ємом $V_1^* > V_1$ і, відповідно, більшою кількістю підведеної теплоти $Q_1^* > Q_1'$:

$$W^{**} = Q_1^* \eta_t' = \frac{c_v V_1^*}{R \varepsilon \varepsilon_v} (p_3 - p_2) \eta_t' = W =$$

$$= \frac{c_v V_1^*}{R \varepsilon \varepsilon_v} (p_3 - p_2) \times$$

$$\times \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \frac{\varepsilon_v \left(\frac{\lambda}{\varepsilon_v^k} - 1 \right) + k(\varepsilon_v - 1)}{\lambda - 1} \right). \quad (12)$$

Відтак із (11) і (12) впливає співвідношення:

$$\frac{V_1^*}{V_1} = \varepsilon_v \frac{\eta_t}{\eta_t'} = \frac{\varepsilon_v \left(1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \right)}{1 - \frac{1}{\varepsilon^{k-1}} \frac{\varepsilon_v \left(\frac{\lambda}{\varepsilon_v^k} - 1 \right) + k(\varepsilon_v - 1)}{\lambda - 1}} > 1. \quad (13)$$

Вагоме збільшення коефіцієнта корисної дії η_t' двигуна внутрішнього згорання в разі втілення циклу Аткінсона–Міллера на основі цик-

МАШИНОБУДУВАННЯ

лу Отто потребує істотного збільшення об'єму робочого простору. Це можна проілюструвати на прикладі ідеального двигуна з параметрами $\varepsilon = 9$, $\lambda = 3,876$ (рис. 8, точки штрихової лінії відповідають «газотурбінному» циклові Гамфрі). Зі збільшенням ε_v об'єм робочого простору зростає майже лінійно пропорційно (рис. 8, *a*). Натомість коефіцієнт корисної дії η'_t дуже чутливий до зміни ε_v і k (рис. 8, *b*). У разі $k = 1,3$, наприклад, максимально можливе зростання коефіцієнта корисної дії η'_t двигуна в 1,19 раза (приблизно на 20 % – від значення 0,48, відповідного циклові Отто, до значення 0,57, відповідного «газотурбінному» циклові Аткинсона–Міллера) потребує збільшення об'єму робочого простору у 2,4 раза (рис. 8, *в*).

Не виходячи за межі властивостей власне двигуна внутрішнього згоряння, бездоганно й вичерпно з'ясувати, чи доцільно таким способом підвищувати його енергетичну ефективність, ніяк не вдасться. З одного боку, високий коефіцієнт корисної дії теплового двигуна – це запорука істотних заощаджень пального та помітного зниження негативних впливів на довкілля за увесь життєвий цикл будь-якої машини з таким двигуном. Але певний сенс таки має евристична гіпотеза: зростання розмірів провокує зростання маси настільки, що ставить під загрозу міцність конструкції, а отже, виникає потреба в підсиленні та відповідному її ускладненні (маса конструкції зростає пропорційно кубові лінійного розміру, а от її міцність – пропорційно квадратові лінійного розміру; можна казати, що маса породжує ще масу). Очевидно, що зайві габарити автомобіля, наприклад, через надмірні розміри двигуна погіршують його аеродинамічність і провокують тим самим постійні додаткові витрати енергії. Або ж вилучення з життєвого чи вантажного простору автомобіля частини його об'єму можна трактувати як зазіхання на потенційну ефективність, продуктивність автомобіля. Надлишкова маса автомобіля породжує також зростання опору коченню, погіршує його динамічність, знижує безпечність у разі зіткнення з перешкодою.

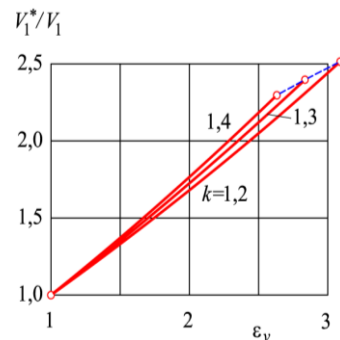
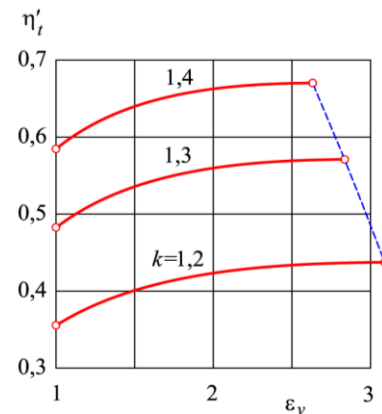
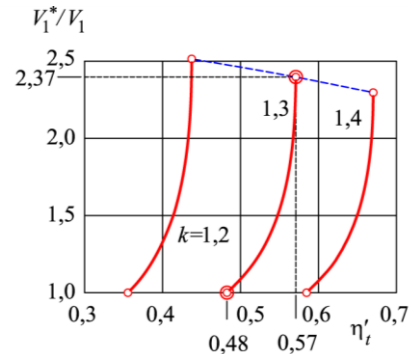
a – a*b – b**в – в*

Рис. 8. Взаємозв'язок між коефіцієнтом корисної дії та робочим об'ємом ідеального двигуна

Fig. 8. The relationship between efficiency coefficient and the displacement of an ideal engine

Формально (без урахування можливих зв'язків між параметрами, див. (13))

$$\frac{\partial V_1^*}{\partial \varepsilon V_1} = \frac{\varepsilon_v (k-1) \eta'_t - \eta_t}{\varepsilon \eta_t^2} > 0.$$

МАШИНОБУДУВАННЯ

Зростання стиску (ступеня стискування) ε нібито сприяє зростанню різниці між габаритами двигунів Отто й Аткинсона. Тобто підвищення засобами Аткинсона ефективності двигуна Отто супроводжується тим більшим зростанням робочого об'єму, чим ефективнішим є двигун від самого початку.

Регулювання тягових потенцій двигуна. Розгляньмо тепер теоретичний цикл Аткинсона окремо (рис. 9). Хай ідеться, наприклад, про цикл $1'-2-3-4-1-1'$, у якому в механічну роботу перетворюється певна номінальна кількість теплоти Q_1 , що підводиться до робочого тіла в ізохорному процесі $2-3$. Якщо навантага на двигун зменшиться, то кількість теплоти, яку слід підводити до робочого тіла, звісно, також має зменшитись. Вважатимемо, що це не позначиться на значенні величини k . Тож буде реалізовано, наприклад, цикл $1'-2-3_1-4_1-1-1'$ з підведенням теплоти в ізохорному процесі $2-3_1$. Кількість теплоти Q_1 можна зменшувати без застережень, поки не виникне граничний цикл $1'-2-3_2-4_2(1)-1'$ із суто ізобарним процесом $4_2(1)-1'$ відведення теплоти Q_2 . Цикл із ще меншим значенням Q_1 у принципі, не можливий. Наприклад, для того щоб реалізувати цикл $1'-2-3'-4'-1-1'$ (який зображе-

но ще й окремо), необхідно було б у процесі $4'-1$ підводити додаткову теплоту Q'_1 , що свідчило б про втрату ефективності двигуна.

У реальному двигуні внутрішнього згоряння можна було б сподіватися на допомогу маховика, який за достатньої кількості акумульованої кінетичної енергії міг би за інерцією допровадити поршень до нижнього мертвого положення. Але в такому разі він (маховик) мусив би поповнити свою енергію на іншій ділянці процесу розширення робочого тіла (можливо, у попередньому циклі). Тож що теоретично, що практично втрата енергетичної ефективності двигуна Аткинсона у випадку малих навантаж є неминучою. Звідси, зокрема, випливає, що двигун Аткинсона, у якого за номінальний править «газотурбінний» цикл, неминуче губить свою перевагу за будь-яких часткових навантаж. Натомість змінюваність навантажень на енергетичній ефективності двигуна Отто (10), ніяк не позначатиметься. Відтак важко сказати, що краще: реалізовувати дещо нижчу ефективність, але постійно одну й ту саму, чи мати можливість реалізовувати вищу ефективність тільки на номінальному режимі роботи двигуна, але губити її на всіх інших режимах. Мабуть,

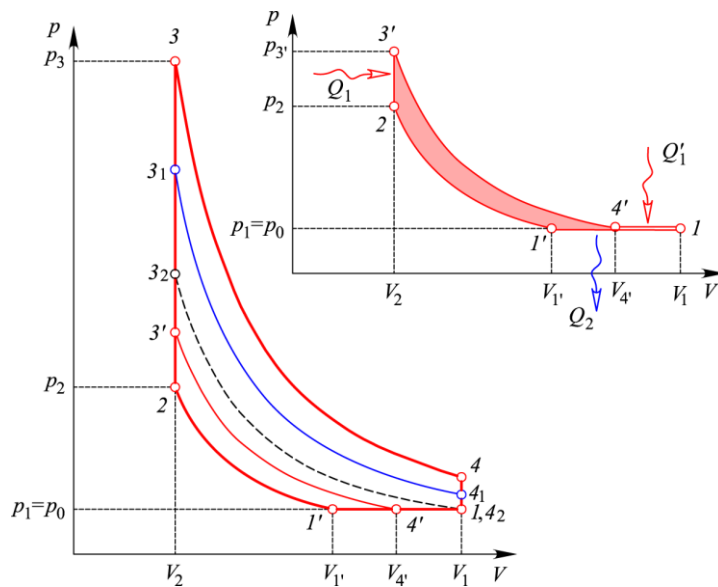


Рис. 9. Цикли Аткинсона за різних навантаж на двигун

Fig. 9. Atkinson cycles under different loads on the engine

МАШИНОБУДУВАННЯ

двигун Отто – це все-таки вигідний технічний компроміс між двотактним двигуном і двигуном Аткинсона.

Звернімося до термодинамічного циклу $1'-2-3'-4'-1-1'$, що «оперує» теплотами:

$$Q_1 = m_x c_v (T_{3'} - T_2) = m_x c_v T_2 \left(\frac{T_{3'}}{T_2} - 1 \right);$$

$$Q_1' = m_x c_p (T_1 - T_{4'}) = m_x c_p T_{4'} \left(\frac{T_1}{T_{4'}} - 1 \right);$$

$$Q_2 = m_x c_p (T_1 - T_{1'}) = m_x c_p T_{1'} \left(\frac{T_1}{T_{1'}} - 1 \right),$$

де m_x – маса робочого тіла на поточному режимі роботи двигуна. Тож коефіцієнт корисної дії циклу визначатиме формула:

$$\eta_t = \frac{Q_1 + Q_1' - Q_2}{Q_1 + Q_1'} = 1 - \frac{Q_2}{Q_1 + Q_1'} = 1 - \frac{k \left(\frac{T_1}{T_{1'}} - 1 \right)}{\frac{T_2}{T_{1'}} \left(\frac{T_{3'}}{T_2} - 1 \right) + k \frac{T_{4'}}{T_{1'}} \left(\frac{T_1}{T_{4'}} - 1 \right)}. \quad (14)$$

Вважатимемо величину $\frac{p_{3'}}{p_2} = \lambda_x$ змінним

параметром, що характеризує навантагу на двигун. Беручи до уваги рівняння адиабат, матимемо співвідношення:

$$\frac{p_{3'}}{p_1} = \left(\frac{V_{4'}}{V_2} \right)^k; \quad \frac{p_2}{p_1} = \left(\frac{V_{1'}}{V_2} \right)^k,$$

звідки випливає рівність $\frac{V_{4'}}{V_{1'}} = \lambda_x^{1/k}$. Дійсним є

співвідношення:

$$\frac{T_1}{T_{1'}} = \frac{V_1}{V_{1'}} = \varepsilon_v; \quad \frac{T_2}{T_{1'}} = \left(\frac{V_{1'}}{V_2} \right)^{k-1} = \varepsilon^{k-1};$$

$$\frac{T_{3'}}{T_2} = \frac{p_{3'}}{p_2} = \lambda_x; \quad \frac{T_{4'}}{T_{1'}} = \frac{V_{4'}}{V_{1'}} = \lambda_x^{1/k};$$

$$\frac{T_1}{T_{4'}} = \frac{V_1}{V_{4'}} = \frac{V_1}{V_{4'}} \varepsilon_v \frac{V_{1'}}{V_1} = \varepsilon_v \frac{V_{1'}}{V_{4'}} = \lambda_x^{1/k} \varepsilon_v.$$

Тож формулу (14) є підстави подати у вигляді:

$$\eta_t = 1 - \frac{k(\varepsilon_v - 1)}{\varepsilon^{k-1}(\lambda_x - 1) + k(\varepsilon_v - \lambda_x^{1/k})}.$$

Відтак виникає можливість унаочнити той факт, що за часткових навантаг двигун може істотно втрачати свою енергетичну ефективність (рис. 10). Наприклад, порівнюючи графік ($k=1,4; \varepsilon_v=3,0$ – двигун Аткинсона) і графік ($\eta_t(k=1,4; \varepsilon_v=1,0) = \text{idem}$ – двигун Отто), можна відзначити, що помітне зростання ККД у разі достатньо великих навантаг, коли $\lambda_x > \lambda_0 = 3,5$, супроводжується істотним його падінням у разі малих навантаг, коли $\lambda_x \ll \lambda_0 = 3,5$. Зі зменшенням величини ε_v перевага двигуна Аткинсона стає менш істотною, зате поширюється на більшу множину режимів.

Кількість робочого тіла, що потрапляє в робочий простір двигуна, визначатимемо за формулою:

$$m = \rho_0 (V_{1'} - V_2),$$

де ρ_0 – умовна густина робочого тіла.

Позначмо $\frac{V_1}{V_2} = \varepsilon_0$ – незмінний параметр

Змінюваний параметр $\frac{V_{1'x}}{V_2} = \frac{V_{1'x}}{V_2} \frac{V_1}{V_1} = \frac{V_{1'x}}{V_1} \varepsilon_0 = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon_{vx}}$

двигуна Аткинсона не повинен би (умовно задля уникнення детонації) перевищувати регламентоване значення величини ε , яке притаманне також порівнюваному двигуну Отто.

Отож $V_2 \leq V_{1'x} \leq \varepsilon V_2$ і $\frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} \leq \varepsilon_{vx} \leq \varepsilon_0$. Це накладає відповідні обмеження на можливості варіювання тяги двигуна Аткинсона зміною параметра ε_{vx} .

МАШИНОБУДУВАННЯ

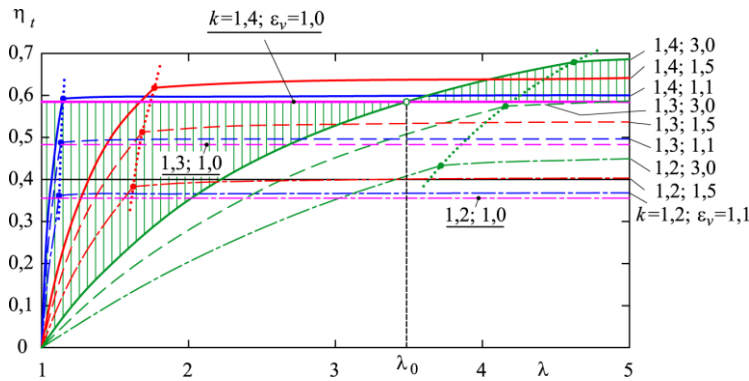


Рис. 10. Ефективність циклів Аткинсона за різних навантаж на двигун

Fig. 10. The efficiency of Atkinson cycles at different loads on the engine

Якщо $\max \varepsilon_{vx} = \varepsilon_0$, то перевага двигуна Аткинсона над двигуном Отто за енергоефективністю на номінальному режимі й за достатньо великих навантаж зменшується. Але при цьому існуватиме можливість регулювати часткові режими аж до марного ходу, не використовуючи умовний цикл із підведенням теплоти в кінці розширення (рис. 9, верхня схема). Натомість у разі $\max \varepsilon_{vx} < \varepsilon_0$ гіршою буде енергоефективність на режимах часткових навантаж.

Розглядаючи ідеальний цикл Аткинсона, (рис. 11, Ω – область допустимих адіабат), розрізнятимемо загальний (рис. 11, а) та вироджений (рис. 11, б) цикли. Задля унаочнення аналізу візьмімо для прикладу $\varepsilon = 9$, $\varepsilon_0 = 12$, $k = 1,4$.

Стосовно загального циклу $1'-2-3-4-1-1'$ (рис. 11, а), оперуючи співвідношеннями

$$\frac{T_1}{T_1'} = \frac{T_1}{T_0} = \frac{V_1}{V_1'} \Rightarrow T_1 = T_0 \frac{V_1}{V_1'}; \quad \frac{T_4}{T_1} = \frac{p_4}{p_1} = \frac{p_4}{p_0};$$

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{p_3}{p_2}, \quad \frac{T_3'}{T_2'} = \frac{p_3'}{p_2};$$

$$\frac{p_2}{p_1'} = \frac{p_2}{p_0} = \left(\frac{V_1'}{V_2} \right)^k \Rightarrow p_2 = p_0 \left(\frac{V_1'}{V_2} \right)^k;$$

$$\frac{T_2}{T_1'} = \frac{T_2}{T_0} = \left(\frac{V_1'}{V_2} \right)^{k-1} \Rightarrow T_2 = T_0 \left(\frac{V_1'}{V_2} \right)^{k-1};$$

$$\frac{p_3}{p_4} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k = \varepsilon_0^k \Rightarrow p_4 = \frac{p_3}{\varepsilon_0^k};$$

$$\frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} = \varepsilon_0^{k-1};$$

$$\frac{p_3'}{p_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k = \varepsilon_0^k;$$

$$\frac{T_3'}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} = \varepsilon_0^{k-1},$$

можна визначити теплоту

$$\begin{aligned} Q_1 &= Q_{1v} = mc_v(T_3 - T_2) = \\ &= mc_v T_2 \left(\frac{T_3}{T_2} - 1 \right) = mc_v T_2 \left(\frac{p_3}{p_2} - 1 \right) = \\ &= \rho_0 c_v T_0 V_1 \frac{V_1' - 1}{V_2} \frac{1}{\varepsilon_0} \left(\frac{p_3}{p_0} - \left(\frac{V_1'}{V_2} \right)^k \right), \end{aligned} \quad (15)$$

що підводиться до робочого тіла, і теплоти

$$\begin{aligned} Q_{2v} &= mc_v(T_4 - T_1) = \\ &= mc_v T_1 \left(\frac{T_4}{T_1} - 1 \right) = mc_v T_0 \frac{V_1}{V_1'} \left(\frac{p_3}{p_0} \frac{\varepsilon_0^k}{\varepsilon_0^k} - 1 \right) = \\ &= \rho_0 c_v T_0 V_1 \frac{V_1' - 1}{V_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_0^k} \frac{p_3}{p_0} - 1 \right); \end{aligned}$$

МАШИНОБУДУВАННЯ

$$\begin{aligned}
 Q_{2p} &= mc_p(T_1 - T_{1'}) = mc_p T_0 \left(\frac{T_1}{T_0} - 1 \right) = \\
 &= \rho_0 c_p (V_{1'} - V_2) T_0 \left(\frac{V_1}{V_{1'}} - 1 \right) = \\
 &= \rho_0 k c_v T_0 V_1 \frac{V_{1'} - 1}{V_2} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{V_{1'}}{V_2} \right), \quad (16)
 \end{aligned}$$

що відводяться від нього. Відтак у циклі буде виконана робота:

$$\begin{aligned}
 W &= W(V_{1'}, p_3) = Q_1 - Q_{2v} - Q_{2p} = \\
 &= \rho_0 c_v T_0 V_1 \frac{V_{1'} - 1}{V_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_0} \left(\frac{p_3}{p_0} - \left(\frac{V_{1'}}{V_2} \right)^k \right) - \right. \\
 &\quad \left. - \left(\frac{1}{\varepsilon_0^k} \frac{p_3}{p_0} - 1 \right) - k \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{V_{1'}}{V_2} \right) \right), \quad (17)
 \end{aligned}$$

із коефіцієнтом корисної дії:

$$\eta_r = \frac{W}{Q_1} = 1 - \frac{\frac{1}{\varepsilon_0^{k-1}} \left(\frac{p_3}{p_0} - \varepsilon_0^k \right) + k \left(\varepsilon_0 - \frac{V_{1'}}{V_2} \right)}{\frac{p_3}{p_0} - \left(\frac{V_{1'}}{V_2} \right)^k}. \quad (18)$$

Стосовно ж циклу $I' - 2 - 3' - I - I'$ (у певному сенсі граничного) дійсними є співвідношення:

$$\frac{T_1}{T_{1'}} = \frac{T_1}{T_0} = \frac{V_1}{V_{1'}} \Rightarrow T_1 = T_0 \frac{V_1}{V_{1'}}; \quad \frac{T_{3'}}{T_2} = \frac{p_{3'}}{p_2};$$

$$\frac{p_2}{p_{1'}} = \frac{p_2}{p_0} = \left(\frac{V_{1'}}{V_2} \right)^k \Rightarrow p_2 = p_0 \left(\frac{V_{1'}}{V_2} \right)^k;$$

$$\frac{T_2}{T_{1'}} = \frac{T_2}{T_0} = \left(\frac{V_{1'}}{V_2} \right)^{k-1} \Rightarrow T_2 = T_0 \left(\frac{V_{1'}}{V_2} \right)^{k-1};$$

$$\frac{p_{3'}}{p_1} = \frac{p_{3'}}{p_0} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^k = \varepsilon_0^k \Rightarrow p_{3'} = p_0 \varepsilon_0^k;$$

$$\frac{T_{3'}}{T_1} = \left(\frac{V_1}{V_2} \right)^{k-1} = \varepsilon_0^{k-1} \Rightarrow T_{3'} = T_1 \varepsilon_0^{k-1},$$

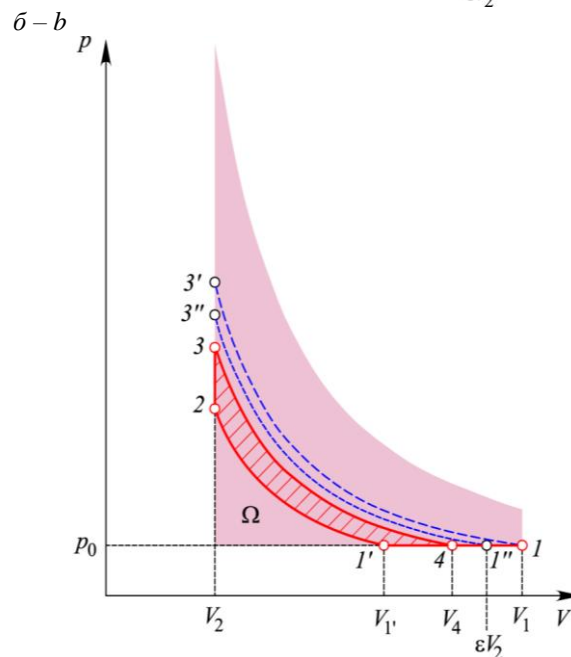
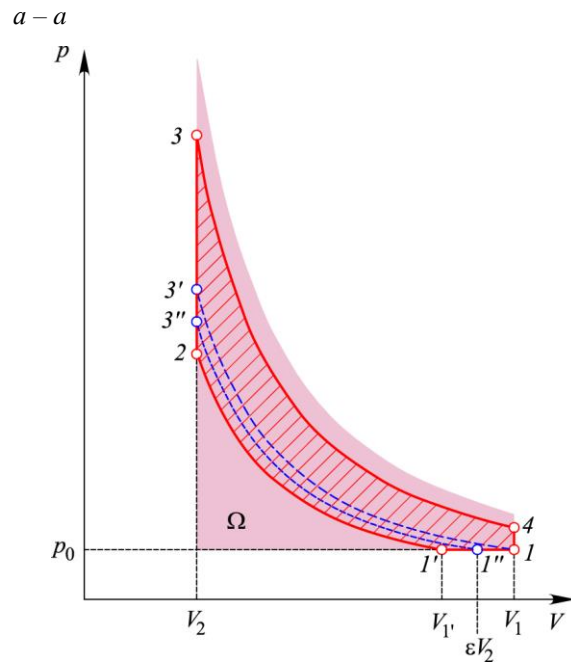


Рис. 11. Два типи циклів Аткинсона

Fig. 11. Two types of Atkinson cycles

МАШИНОБУДУВАННЯ

а тому

$$\begin{aligned}
 Q_1 = Q_{1v} = mc_v(T_{3'} - T_2) = \\
 = mc_v T_2 \left(\frac{T_{3'}}{T_2} - 1 \right) = mc_v T_2 \left(\frac{p_{3'}}{p_2} - 1 \right) = \\
 = \rho_0 c_v T_0 V_1 \frac{V_{1'} - 1}{V_2} \frac{1}{\varepsilon_0} \left(\varepsilon_0^k - \left(\frac{V_{1'}}{V_2} \right)^k \right); \quad (19)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 Q_2 = Q_{2p} = mc_p(T_1 - T_{1'}) = mc_p T_0 \left(\frac{T_1}{T_0} - 1 \right) = \\
 = \rho_0 k c_v T_0 V_1 \frac{V_{1'} - 1}{V_2} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{V_{1'}}{V_2} \right). \quad (20)
 \end{aligned}$$

Вирази (19) і (20) впливають також, як і слід було сподіватись, із виразів (15) і (16) у разі $\frac{p_3}{p_0} \rightarrow \varepsilon_0^k$.

Формули (17) і (18) мають сенс у разі $\frac{p_3}{p_0} \geq \frac{p_{3'}}{p_0} = \varepsilon_0^k$. У разі ж $\frac{p_3}{p_0} < \varepsilon_0^k$ основний термодинамічний цикл (рис. 11, а) вироджується у цикл із вимушеним підведенням теплоти в кінці такту розширення робочого тіла (рис. 9, схема вгорі-праворуч, та рис. 11, б).

Співвідношення (рис. 11, б)

$$\frac{T_2}{T_{1'}} = \frac{T_2}{T_0} = \left(\frac{V_{1'}}{V_2} \right)^{k-1}; \quad \frac{p_2}{p_{1'}} = \frac{p_2}{p_0} = \left(\frac{V_{1'}}{V_2} \right)^k;$$

$$\frac{T_3}{T_2} = \frac{p_3}{p_2}; \quad \frac{T_3}{T_4} = \left(\frac{V_4}{V_2} \right)^{k-1},$$

$$\frac{p_3}{p_4} = \frac{p_3}{p_0} = \left(\frac{V_4}{V_2} \right)^k; \quad \frac{T_1}{T_4} = \frac{V_1}{V_4};$$

$$\frac{T_1}{T_{1'}} = \frac{T_1}{T_0} = \frac{V_1}{V_{1'}}.$$

дають змогу визначити такі величини:

$$Q_{1v} = mc_v(T_3 - T_2) =$$

$$= \rho_0 c_v T_0 V_1 \frac{V_{1'} - 1}{V_2} \frac{1}{\varepsilon_0} \left(\frac{p_3}{p_0} - \left(\frac{V_{1'}}{V_2} \right)^k \right);$$

$$Q_{1p} = mc_p(T_1 - T_4) = mkc_v T_4 \left(\frac{T_1}{T_4} - 1 \right) =$$

$$= \rho_0 k c_v T_4 V_2 \left(\frac{V_{1'}}{V_2} - 1 \right) \left(\frac{V_1}{V_4} - 1 \right) =$$

$$= \rho_0 k c_v T_0 V_1 \frac{V_{1'} - 1}{V_2} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_0} \left(\frac{p_3}{p_0} \right)^{1/k} \right);$$

$$Q_{2p} = mc_p(T_1 - T_0) = \rho_0 k c_v T_0 V_1 \frac{V_{1'} - 1}{V_2} \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{V_{1'}}{V_2} \right);$$

$$W = Q_{1v} + Q_{1p} - Q_{2p} =$$

$$\begin{aligned}
 = \rho_0 c_v T_0 V_1 \frac{V_{1'} - 1}{V_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_0} \left(\frac{p_3}{p_0} - \left(\frac{V_{1'}}{V_2} \right)^k \right) + \right. \\
 \left. + k \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_0} \left(\frac{p_3}{p_0} \right)^{1/k} \right) - k \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{V_{1'}}{V_2} \right) \right); \quad (21)
 \end{aligned}$$

$$\eta_r = \frac{W}{Q_1} = 1 -$$

$$\frac{k \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_0} \frac{V_{1'}}{V_2} \right)}{\frac{1}{\varepsilon_0} \left(\frac{p_3}{p_0} - \left(\frac{V_{1'}}{V_2} \right)^k \right) + k \left(1 - \frac{1}{\varepsilon_0} \left(\frac{p_3}{p_0} \right)^{1/k} \right)}. \quad (22)$$

Формули (21) і (22) мають сенс у разі

$$1 \leq \frac{V_{1'}}{V_2} \leq \varepsilon, \quad 1 \leq \frac{p_3}{p_0} \leq \varepsilon_0^k.$$

Характер залежності умовної роботи циклу Аткинсона

МАШИНОБУДУВАННЯ

$$\varpi = \frac{W}{\rho_0 c_v T_0 V_1}$$

від параметрів керування тягою двигуна

$$\frac{V_1'}{V_2} = \nu \text{ і } \frac{P_3}{P_0} = \pi$$

ілюструє рис. 12. Величину ν є сенс трактувати як кількісну характеристику робочого тіла, а величину π – як якісну характеристику. Вертикальна пряма $\pi = \varepsilon_0^k = \text{idem}$ ділить діаграму на ліву частину, що відповідає виродженим циклам, і праву, яка відповідає загальним циклам. Очевидно, що функція $\varpi = \varpi(\nu, \pi)$ не належить до монотонних.

Загалом немонотонною є й залежність коефіцієнта корисної дії η_t від прийнятих режимних (регулювальних) параметрів (характеристик) ν та π (рис. 13). Але за кожного фіксованого значення параметра ν вона все ж монотонно зростаюча. Коефіцієнт корисної дії η_t циклу Аткинсона, звісно, за певних значень ν і π може перевищувати коефіцієнт корисної дії η_{t0} циклу Отто, якому відповідають задані параметри V_2 і ε . У разі $\pi \geq \varepsilon_0^k$ безперечно енергетично найефективнішими є цикли з параметром $\nu = \max \nu = \varepsilon = 9$.

За потреби керувати умовною роботою ϖ у бік її зменшення спочатку, за можливості, доцільно досягнути й зберігати максимальним значення величини ν ($\nu = \max \nu = \varepsilon$), зменшуючи тільки значення параметра π , аж доки далі не доведеться одночасно зменшувати ще й значення величини ν (рис. 14). Наприклад, у разі $\pi \leq \max \pi = 50$ керувати роботою циклу доцільно вздовж лінії $ABCDE$. У цьому прикладі коефіцієнт корисної дії циклу Аткинсона досягає найбільшого значення $\eta_t = \max \eta_t = 0,622$, що на 6 % є більшим за значення $\eta_{t0} = 0,585$ коефіцієнта корисної дії, відповідного циклу Отто. Але при цьому розмір двигуна Аткинсона в $\frac{V_1'}{V_1} = \frac{\varepsilon_0}{\varepsilon} = \frac{12}{9} = 1,33$ раз (на третину) буде більшим.

Тож якщо в процесі конструювання двигуна Аткинсона–Міллера стають помітними енергоощадні переваги циклу Гамфрі, то в процесі регулювання тяги синтезованого двигуна такого кшталту переваги цього циклу вже не простежуються. Справді (рис. 13), режими, яким властиве співвідношення $\pi = \varepsilon_0^k$, загалом не мають переваги перед режимами, яким властиві співвідношення $\nu = \varepsilon$ і $\pi \rightarrow \pi_{\max}$ (π_{\max} – фізично допустимі значення параметра π).

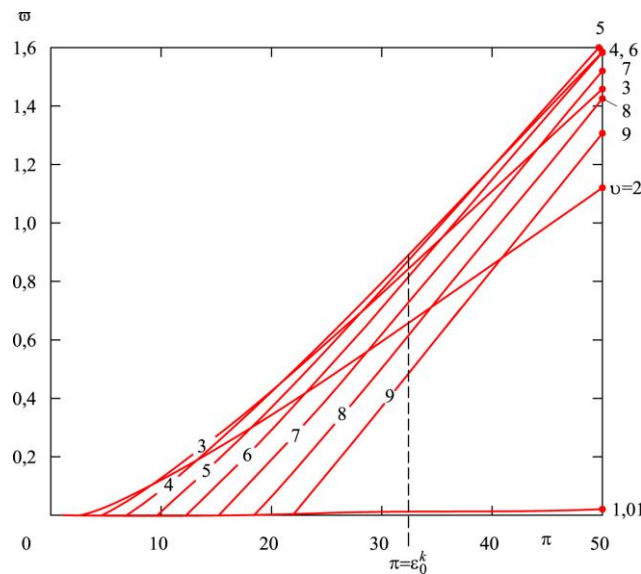


Рис. 12. Залежність умовної роботи двигуна від регулювальних параметрів

Fig. 12. Dependence of conditional operation of the engine on adjustment parameters

МАШИНОБУДУВАННЯ

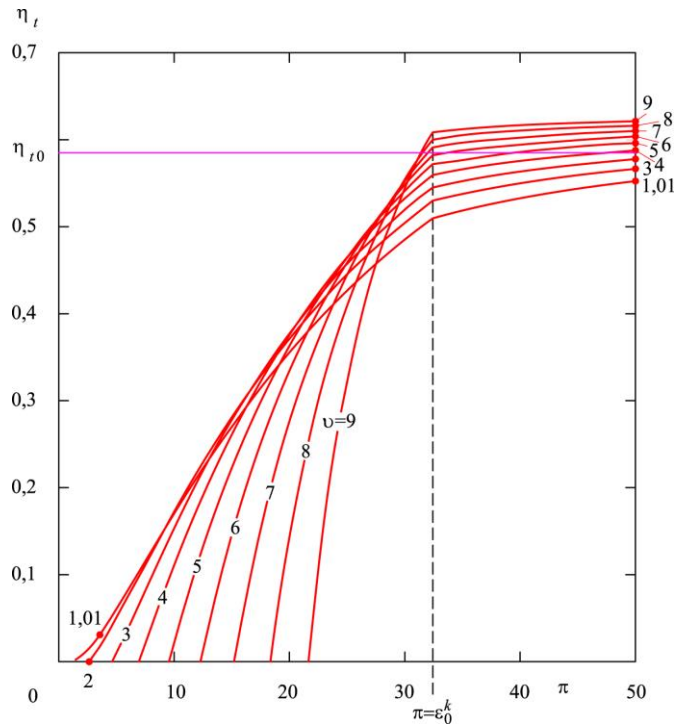


Рис. 13. Залежність коефіцієнта корисної дії двигуна від регулювальних параметрів

Fig. 13. Dependence of efficiency coefficient of the engine on adjustment parameters

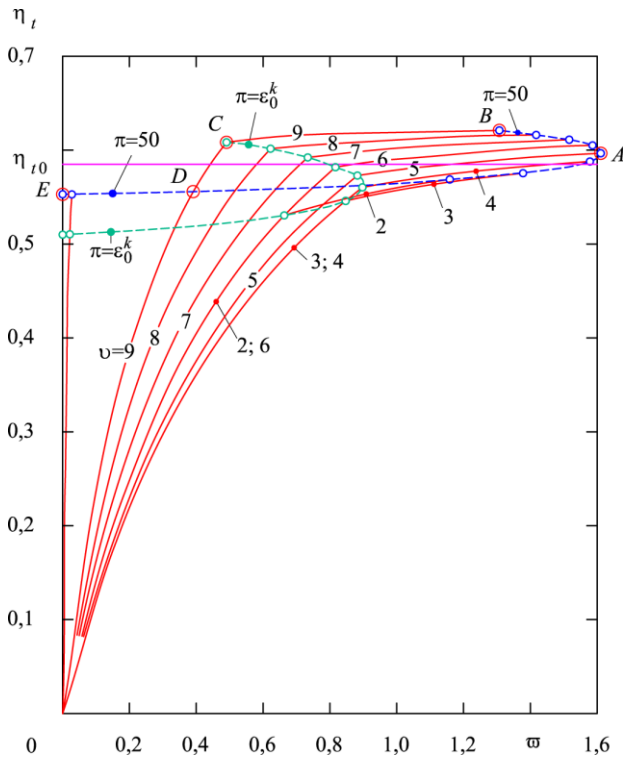


Рис. 14. Взаємозумовленість ефективності двигуна й регулювальних параметрів

Fig. 14. Interdependence of engine efficiency and adjustment parameters

МАШИНОБУДУВАННЯ

Об'єктивно не вдасться побачити істинний рівень досконалості двигуна, залишаючись у рамках суто його власної парадигми, не беручи до уваги нічого з того, що може виявитися в системі, куди його залучать працювати. Найважливішими системними ознаками досконалості двигуна є ступінь потенційної автономності, енергоощадність, енергоефективність, екологічність, масогабаритність. І всі ці ознаки так чи інакше позначаються на властивостях та ефективності машини з приводом від цього двигуна.

При цьому доводиться розрізняти конструктивні, робочі та функційні масогабарити. Наприклад, звичний двигун Аткинсона поступається двигунові Отто як за конструктивними, так і робочими масогабаритами, але є привабливішим за функційними масогабаритами – робочий цикл здійснюється не за два, а за один оберт його вала. Планетарно-зубчастий хитневий механізм перетворює звичний двигун Аткинсона на конструктивно компактніший, але повний робочий цикл у ньому здійснюватиметься вже за два оберти вихідного вала. Та й за робочими масогабаритами він все одно поступатиметься двигуну Отто, як і, зрештою, двигун Міллера.

Перелічені системні ознаки досконалості двигуна в значній мірі взаємопов'язані. Низька енергоощадність негативно позначається на екологічності та до певної міри обмежує автономність. Підвищення ж енергоощадності, вимірюваної коефіцієнтом корисної дії, знижує тягові потенції двигуна, його енергоефективність, тобто здатність перетворити більше теплоти на більшу кількість роботи. Взаємозв'язок між енергоощадністю й енергоефективністю відносно легко ідеалізувати й тим самим унаочнити засобами аналізу термодинамічних циклів, особливо на прикладі двигуна Аткинсона–Міллера.

Наукова новизна та практична значимість

З'ясувалось, що двигунові Аткинсона–Міллера справді потенційно властиві вищі значення коефіцієнта корисної дії порівняно з двигуном Отто. Але при цьому зменшується робота, яку цей двигун здатен продукувати в робочому просторі такого самого об'єму, що

й у традиційного двигуна Отто. Щоб відновити його тягові потенції, доведеться збільшити робочий об'єм (літраж), жертвуючи тим самим можливими масогабаритними перевагами. При цьому робочий об'єм формально вигідно збільшувати, аж поки робочий цикл Аткинсона–Міллера не виродиться в цикл Гамфрі. Проте коли виникає потреба зменшувати тягу двигуна Аткинсона–Міллера в разі зменшення навантаги на його валу, цикл Гамфрі перестає бути привабливим.

З одного боку, зростання коефіцієнта корисної дії теплового двигуна сприяє істотному заощадженню пального та зниженню загроз довікллю упродовж життєвого циклу машини з приводом від такого енергоощадного двигуна. Але зростання масогабаритних розмірів двигуна внаслідок утілення енергоощадного робочого циклу Аткинсона–Міллера провокує зростання маси двигуна настільки, що ставить під загрозу міцність конструкції. Тож виникає потреба в її підсиленні: у першому наближенні маса конструкції зростає пропорційно кубові лінійного розміру, а от її міцність – пропорційно квадратові лінійного розміру; можна стверджувати, що кожна додаткова маса породжує ще нову масу. Надлишкові, зумовлені надмірними розмірами двигуна, габарити автомобіля, наприклад, погіршують його аеродинамічність і провокують тим самим постійні додаткові витрати енергії в процесі реалізації транспортних функцій. Або ж вилучення з життєвого чи вантажного простору автомобіля частини його об'єму можна трактувати як зниження потенційної продуктивності автомобіля. Надмірна маса автомобіля призводить також до зростання опору коченню коліс, погіршує його розгінну й гальмівну динамічність, знижує рівень безпечності в разі зіткнення з перешкодою. Отже, підвищення таким способом коефіцієнта корисної дії теплового двигуна насправді може й не визнаватися як удосконалення через оцінку набутих робочою чи транспортною машиною експлуатаційних властивостей.

Масогабарити практично завжди тлумачили як надзвичайно вагому характеристику досконалості двигуна. Турбонаддув, наприклад, спочатку використовували саме для підвищення потужності двигуна в рамках заданих його ма-

МАШИНОБУДУВАННЯ

согабаритів. Це тільки згодом наддув став ще й засобом підвищення енергоефективності та екологічності. Підвищення ж потужності шляхом збільшення робочого об'єму вважалось не дуже доречним через зростання матеріаломісткості конструкції та поточних механічних втрат енергії в процесі її функціонування. Потужність за фіксованого робочого об'єму підвищували радше збільшенням номінальної частоти обертання колінчастого вала. Щоправда, це призвело до зростання масогабаритів трансмісії робочої машини чи автомобіля.

Висновки

1. Швидке (аж до миттєвого) внутрішнє згоряння пальної суміші в тепловому двигуні є найефективнішим процесом перетворення теплоти на механічну роботу.

2. Використання теорії ідеальних термодинамічних циклів (так званих циклів із нульовою потужністю) насправді дозволяє дуже простими засобами коректно й наочно пояснити та

оцінити прояв енергетично корисного ефекту від розширення робочого ходу в двигуні швидкого внутрішнього згоряння.

3. Підвищення коефіцієнта корисної дії завдяки подовженню робочого ходу поршня вимушено супроводжується зростанням маси й габаритів двигуна, і тому негативно позначається на властивостях автомобіля з приводом від такого двигуна. Наприклад, коефіцієнт корисної дії циклу Аткинсона може бути на 6 % більшим за значення коефіцієнта корисної дії відповідного циклу Отто. Але при цьому його характерний розмір на третину виявиться більшим.

4. Енергоефективність двигуна Аткинсона–Міллера порівняно з двигуном Отто є помітною на режимах великого навантаження. Але автомобільний двигун зазвичай працює на так званих часткових режимах.

5. Двигун Отто є вигідним технічним компромісом між двотактним двигуном і двигуном Аткинсона.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Гащук П. М. *Енергія та упорядкований рух*. Львів : Українські технології, 2004. 608 с.
2. Al-Sarkhi A., Akash B. A., Jaber J. O., Mohsen M. S., Abu-Nada E. Efficiency of Miller engine at maximum power density. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2002. Vol. 29. Iss. 8. P. 1159–1167. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0735-1933\(02\)00444-X](https://doi.org/10.1016/S0735-1933(02)00444-X)
3. Al-Sarkhi A., Jaber J. O., Probert S. D. Efficiency of a Miller engine. *Applied Energy*. 2006. Vol. 83. Iss. 4. P. 343–351. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2005.04.003>
4. Andresen B., Salamon P., Berry R. S. Thermodynamics in finite time. *Physics Today*. 1984. Vol. 37. Iss. 9. P. 62–70. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2916405>
5. Atkinson J. *Gas engine : Patent 336505A US*. USA, 1886.
6. Atkinson J. *Gas engine : Patent 367496A US*. USA, 1887.
7. Benajes J., Novella R., Arthozoul S., Kolodziej C. Particle Size Distribution Measurements from Early to Late Injection Timing Low Temperature Combustion in a Heavy Duty Diesel Engine. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*. 2010. Vol. 3. Iss. 1. P. 567–581. DOI: <https://doi.org/10.4271/2010-01-1121>
8. Benajes J., Serrano J. R., Molina S., Novella R. Potential of Atkinson cycle combined with EGR for pollutant control in a HD diesel engine. *Energy Conversion and Management*. 2009. Vol. 50. Iss. 1. P. 174–183. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.08.034>
9. Brijesh P., Sreedhara S. Exhaust emissions and its control methods in compression ignition engines : A review. *International Journal of Automotive Technology*. 2013. Vol. 14. Iss. 2. P. 195–206. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12239-013-0022-2>
10. Carnot S. *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*. Paris : Gauthier-Villars, Imprimeur-Libraire, 1872. 102 p.
11. Chen L., Zhang W., Sun F. Power, efficiency, entropy-generation rate and ecological optimisation for a class of generalized irreversible universal heatengine cycles. *Applied Energy*. 2007. Vol. 84. Iss. 5. P. 512–525. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2006.09.004>
12. Chen Z., Konno M., Oguma M., Yanai T. Experimental study of CI natural-gas / DME homogeneous charge engine. *SAE Technical Paper Series*. 2000. Vol. 109. Iss. 3. P. 442–451. DOI: <https://doi.org/10.4271/2000-01-0329>

МАШИНОБУДУВАННЯ

13. Clarke D., Smith W. J. S The Simulation, Implementation and Analysis of the Miller Cycle Using an Inlet Control Rotary Valve. *SAE Technical Paper Series*. 1997. P. 61–70. DOI: <https://doi.org/10.4271/970336>
14. Cornell S. O., Leman S. A. *Engine valve actuation system (Caterpillar) : Patent 7004122 US*. USA, 2006.
15. Demirci O. K., Uyumaz A., Saridemir S. and Çinar C. Performance and Emission Characteristics of a Miller Cycle Engine. *International Journal of Automotive Technology (IJAET)*. 2018. Vol. 7. Iss. 3. P. 107–116. DOI: <https://doi.org/10.18245/ijaet.486408>
16. Ebrahimi R. Effects of mean piston speed, equivalence ratio and cylinder wall temperature on performance of an Atkinson engine. *Mathematical and Computer Modelling*. 2011. Vol. 53. Iss. 5–6. P. 1289–1297. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2010.12.015>
17. Ebrahimi R. Performance analysis of an irreversible Miller cycle with considerations of relative air-fuel ratio and stroke length. *Applied Mathematical Modelling*. 2012. Vol. 36. Iss. 9. P. 4073–4079. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.11.031>
18. Edwards S., Frankle G., Wirbeleit F., Raab A. The Potential of a Combined Miller Cycle and Internal EGR Engine for Future Heavy Duty Truck Applications. *SAE Technical Paper*. 1998. P. 1–21. DOI: <https://doi.org/10.4271/980180>
19. Ehleskog M., Gjirja S., Denbratt I. Effects of Variable Inlet Valve Timing and Swirl Ratio on Combustion and Emissions in a Heavy Duty Diesel Engine. *SAE Technical Paper*. 2012. P. 1–12. DOI: <https://doi.org/10.4271/2012-01-1719>
20. Ebrahimi R. Thermodynamic modeling of performance of a Miller cycle with engine speed and variable specific heat ratio of working fluid. *Computers and Mathematics with Applications*. 2011. Vol. 62. P. 2169–2176. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2011.07.002>
21. Fukuzawa Y., Kakuhama Y., Shimoda H., Endo H., Tanaka K. Development of High Efficiency Miller Cycle Gas Engine. *Mitsubishi Heavy Industries*. 2001. Vol. 38, No. 3. P. 146–150.
22. Ge Y., Chen L., Sun F., Wu C. Effects of heat transfer and variable specific heats of working fluid on performance of a Miller cycle. *International Journal of Ambient Energy*. 2005. Vol. 26. Iss. 4. P. 203–214. DOI: <https://doi.org/10.1080/01430750.2005.9674991>
23. Ge Y., Chen L., Sun F., Wu C. Effects of heat transfer and friction on the performance of an irreversible air-standard Miller cycle. *International Communications in Heat and Mass Transfer*. 2005. Vol. 32. Iss. 8. P. 1045–1056. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2005.02.002>
24. Ge Y., Chen L., Sun F., Wu C. Reciprocating heat-engine cycles. *Applied Energy*. 2005. Vol. 81. Iss. 4. P. 397–408. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2004.09.007>
25. Gonca G., Hocaoglu M. F. Performance Analysis and Simulation of a Diesel – Miller Cycle (DiMC) Engine. *Arabian Journal for Science and Engineering*. 2019. Vol. 44. P. 5811–5824. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13369-019-03747-4>
26. Gonca G., Sahin B., Ust Y. Investigation of Heat Transfer Influences on Performance of Air-Standard Irreversible Dual-Miller Cycle. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*. 2015. Vol. 29. Iss. 4. P. 678–683. DOI: <https://doi.org/10.2514/1.T4512>
27. Goto T., Hatamura K., Takizawa S., Hayama N., Abe H., Kanesaka H. Development of V6 Miller Cycle Gasoline Engine. *SAE Technical Paper*. 1994. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.4271/940198>
28. Grab-Rogaliński K., Szwaja S., Tutak W. The Miller Cycle Based IC Engine Fuelled with a CNG / Hydrogen. *Journal of KONES. Powertrain and Transport*. 2014. Vol. 21. Iss. 4. P. 137–144. DOI: <https://doi.org/10.5604/12314005.1130459>
29. Hatamura K., Hayakawa M., Goto T., Hitomi M. A study of the improvement effect of Miller-cycle on mean effective pressure limit for high-pressure supercharged gasoline engines. *JSAE Review*. 1997. Vol. 18. Iss. 2. P. 101–106. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0389-4304\(96\)00069-0](https://doi.org/10.1016/S0389-4304(96)00069-0)
30. Heikkilä J., Happonen M., Murtonen T., Lehto K., Sarjoavaara T., Larmi M., ... Virtanen, A. Study of Miller timing on exhaust emissions of a hydrotreated vegetable oil (HVO) – fueled diesel engine. *Journal of the Air & Waste Management Association* 2012. Vol. 62. Iss. 11. P. 1305–1312. DOI: <https://doi.org/10.1080/10962247.2012.708383>
31. Heywood J. B. *Ideal models of engine cycles*. Singapore : McGraw-Hill Education, 1988. 930 p.
32. Higuchi N., Sunaga Y., Tanaka M., Shimada H. Development of a New Two-Motor Plug-In Hybrid System. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*. 2013. Vol. 2. Iss. 1. P. 135–145. DOI: <https://doi.org/10.4271/2013-01-1476>

МАШИНОБУДУВАННЯ

33. Kong S. C. A study of natural gas / DME combustion in HCCI engines using CFD with detailed chemical kinetics. *Fuel*. 2007. Vol. 86. Iss. 10. P. 1483–1489. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.11.015>
34. Liu J., Chen J. Optimum performance analysis of a class of typical irreversible heat engines with temperature-dependent heat capacities of the working substance. *International Journal of Ambient Energy*. 2010. Vol. 31. Iss. 2. P. 59–70. DOI: <https://doi.org/10.1080/01430750.2010.9675103>
35. Martins J., Uzuneanu K., Ribeiro B., Jasasky O. Thermodynamic Analysis of an Over-Expanded Engine. *SAE Technical Paper*. 2004. P. 1–15. DOI: <https://doi.org/10.4271/2004-01-0617>
36. Martins M. E. S., Lanzanova T. D. M. Full-load Miller cycle with ethanol and EGR : Potential benefits and challenges. *Applied Thermal Engineering*. 2015. Vol. 90. P. 274–285. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.06.086>
37. Mikalsen R., Wang Y. D., Roskilly A. P. A Comparison of Miller and Otto Cycle Natural Gas Engines for Small Scale CHP Applications. *Applied Energy*. 2009. Vol. 86. Iss. 6. P. 922–927. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.09.021>
38. Miller R. *High expansion, spark-ignited, gas burning, internal combustion engines : US Patent 2773490A*. USA, 1952, 1956.
39. Miller R. *Supercharged Engine : US Patent 2817322A*. USA, 1957.
40. Miller R. H. Supercharging and Internal Cooling Cycle for High Output. *Transactions ASME*. 1947. Vol. 69. P. 453–464.
41. Miller R. H., Lieberherr H. U. The Miller supercharging system for Diesel and gas engines operating characteristics. *CIMAC*. 1957. P. 787–803.
42. Millo F., Gianoglio B. M., Delneri D. Computational Analysis of Internal and External EGR Strategies Combined with Miller Cycle Concept for a Two Stage Turbocharged Medium Speed Marine Diesel Engine. *SAE International Journal of Engines*. 2011. Vol. 4. Iss. 1. P. 1319–1330. DOI: <https://doi.org/10.4271/2011-01-1142>
43. Mo H., Yongquan H. Y., Xiaojian M. X., Zhuo B. Investigations on the Potential of Miller Cycle for Performance Improvement of Gas Engine. *Global Journal of Researches in Engineering : B Automotive Engineering*. 2016. Vol. 16. Iss. 1. P. 37–46.
44. Niculae M., Clenci A., Iorga-Simăn V., Niculescu R. An Overview on the Miller-Atkinson Over-expansion Thermodynamic Cycle. *IOP Conf. Series : Materials Science and Engineering*. 2019. Vol. 564 P. 1–7. DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/564/1/012125>
45. Ribeiro, B. Martins, J. Direct Comparison of an Engine Working under Otto, Miller and Diesel Cycles : Thermodynamic Analysis and Real Engine Performance. *SAE Technical Paper*. 2007. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.4271/2007-01-0261>
46. Wang Y., Lin L., Roskilly A. P., Zeng S., Huang J., He Y., Huang X., Huang H., Wei H., Li S., Yang J. An analytic study of applying Miller cycle to reduce NO_x emission from petrol engine. *Applied Thermal Engineering*. 2007. Vol. 27. Iss. 11–12. P. 1779–1789. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.01.013>
47. Wu C., Puzinauskas P. V., Tsai J. S. Performance analysis and optimization of a supercharged Miller cycle Otto engine. *Applied Thermal Engineering*. 2003. Vol. 23. Iss. 5. P. 511–521. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00239-9](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00239-9)
48. Zhao Y, Chen J. Performance analysis of an irreversible Miller heat engine and its optimum criteria. *Applied Thermal Engineering*. 2007. Vol. 27. P. 2051–2058. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.12.002>

П. М. ГАЩУК¹, С. В. НИКИПЧУК^{2*}

¹Каф. «Експлуатація транспортних засобів та пожежно-спасальної техніки», Львівський державний університет безпеки життєдіяльності, ул. Клепарівська, 35, Львів, Україна, 79007, тел. +38 (067) 476 84 83, ел. пошта retroh@meta.ua, ORCID 0000-0002-2345-4879

^{2*}Каф. «Експлуатація та ремонт автомобільної техніки», Національний університет «Львівська політехніка», ул. С. Бандери, 12, Львів, Україна, 79013, тел. +38 (097) 217 23 15, ел. пошта nikipch@gmail.com, ORCID 0000-0003-2499-9990

ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОЧИХ ЦИКЛОВ ДВИГАТЕЛЯ БЫСТРОГО ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С УДЛИНЕННЫМ РАБОЧИМ ХОДОМ

Цель. Мы предусматриваем в самых общих терминах исследовать эффективность рабочих циклов двигателя быстрого внутреннего сгорания с удлинённым рабочим ходом. Удлинение рабочего хода предусмотрено, например, в так называемых двигателях Аткинсона и Миллера, противопоставляемых как более совершенных традиционному двигателю Отто. **Методика.** Разные рабочие циклы для выявления их исключительно принципиальных особенностей рассмотрены идеализированном виде с применением понятий основной работы цикла, количественной и качественной характеристик рабочего тела. **Результаты.** Выяснено, в частности, следующее: 1) чтобы двигатель Аткинсона–Миллера выполнял одинаковую с двигателем Отто работу, он должен иметь заметно больший рабочий объём; 2) в случае заранее заданного количества механической работы коэффициент полезного действия и ход расширения цикла Аткинсона–Миллера растут до тех пор, пока цикл не превращается в цикл Гамфри; 3) повышение средствами Аткинсона эффективности двигателя Отто сопровождается тем большим ростом рабочего объёма, чем более эффективным является двигатель изначально. **Научная новизна.** Доказано, что при частичных нагрузках двигатель Аткинсона может существенно терять свою энергетическую эффективность. К тому же, если в процессе виртуального конструирования двигателя Аткинсона становятся заметными энергоэкономные преимущества цикла Гамфри, то в процессе мнимого регулирования тяги синтезированного двигателя такого типа преимущества этого цикла уже не прослеживаются. **Практическая значимость.** В целом существуют основания утверждать, что двигатель Отто – это все-таки выгодный технический компромисс между двухтактным двигателем и двигателем Аткинсона. С одной стороны, увеличение коэффициента полезного действия двигателя быстрого внутреннего сгорания способствует существенной экономии горючего и снижению угроз окружающей среде на протяжении жизненного цикла машины с приводом от такого энергоэкономного двигателя. Но с другой стороны, воплощение энергоэкономного рабочего цикла Аткинсона–Миллера будет сопровождаться ростом массогабаритных размеров двигателя и отрицательно сказываться на свойствах машины.

Ключевые слова: двигатель быстрого внутреннего сгорания; удлинённый рабочий ход; рабочий цикл; двигатель Аткинсона–Миллера; двигатель Отто; энергетическая эффективность; коэффициент полезного действия

P. M. HASHCHUK¹, S. V. NIKIPCHUK^{2*}

¹Dep. «Operation of vehicles and fire rescue equipment», Lviv State University of Life Safety, Kleparivska St., 35, Lviv, Ukraine, 79007, tel. +38 (067) 476 84 83, e-mail petroh@meta.ua, ORCID 0000-0002-2345-4879

^{2*}Dep. «Operation and repair of automotive vehicles», Lviv Polytechnic National University, S. Bandera St., 12, Lviv, Ukraine, 79013, tel. +38 (097) 217 23 15, e-mail nikipch@gmail.com, ORCID 0000-0003-2499-9990

THE EFFICIENCY OF WORKING CYCLES IN THE RAPID INTERNAL COMBUSTION ENGINE WITH THE EXTENDED WORKING STROKE

Purpose: The investigation covers the efficiency of working cycles in the rapid internal combustion engine with the extended working stroke. The extended working stroke is applied in so-called Atkinson/Miller engines that are considered to be more effective than traditional Otto engines. **Methodology.** In order to identify purely distinctive features of different working cycles, they were investigated in an idealized form using the concepts of a conditional working cycle, quantitative as well as qualitative characteristics of the working fluid. **Findings.** The investigation illustrates the following: 1) the Otto engine should have a significantly larger displacement to function the same way as the Atkinson/Muller engine; 2) if the mechanic work is predetermined, the efficiency coefficient and the course of expansion of the Atkinson-Miller cycle increase until it turns into the Humphrey cycle; 3) the increase of Otto engine's efficiency using Atkinson's means involves larger displacement if the engine was efficient from the very beginning. **Originality.** Atkinson's engine may significantly lose its efficiency in energy at partial loads. If in the process of virtual design of the Atkinson engine the energy-saving advantages of Humphrey cycle become noticeable, then in the process of imaginary regulation of the thrust of an already synthesized engine of this type the advantages of this cycle are no longer traceable. **Practical value.** In general, the Otto engine could be considered as a still profitable technical compromise between a two-stroke engine and the Atkinson engine. On the one hand, in-

МАШИНОБУДУВАННЯ

creasing the efficiency coefficient of a rapid internal combustion engine contributes to significant fuel savings and environmental hazards reduction throughout the life cycle of a machine driven by such an energy-saving engine. But on the other hand, the implementation of the energy-saving Atkinson/Miller working cycle will be accompanied by an increase in the mass and size of the engine and will negatively affect the properties of the machine.

Keywords: rapid internal combustion engine; extended working stroke; working cycle; Atkinson-Miller engine; Otto engine; energy efficiency; efficiency

REFERENCES

1. Hashchuk, P. M. *Enerhiia ta uporiadkovanyi rukh*. Lviv: Ukrainski tekhnolohii.
DOI: <http://hdl.handle.net/123456789/3790> (in English)
2. Al-Sarkhi, A., Akash, B. A., Jaber, J. O., Mohsen, M. S., & Abu-Nada, E. (2002). Efficiency of Miller engine at maximum power density. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 29(8), 1159-1167.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S0735-1933\(02\)00444-X](https://doi.org/10.1016/S0735-1933(02)00444-X) (in English)
3. Al-Sarkhi, A., Jaber, J. O., & Probert, S. D. (2006). Efficiency of a Miller engine. *Applied Energy*, 83(4), 343-351. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2005.04.003> (in English)
4. Andresen, B., Salamon, P., & Berry, R. S. (1984). Thermodynamics in finite time. *Physics Today*, 37(9), 62-70.
DOI: <https://doi.org/10.1063/1.2916405> (in English)
5. Atkinson, J. (1886). *Gas engine: US 336505A*.
6. Atkinson, J. (1887). *Gas engine: US 367496A*.
7. Benajes, J., Novella, R., Arthozoul, S., & Kolodziej, C. (2010). Particle Size Distribution Measurements from Early to Late Injection Timing Low Temperature Combustion in a Heavy Duty Diesel Engine. *SAE International Journal of Fuels and Lubricants*, 3(1), 567-581. DOI: <https://doi.org/10.4271/2010-01-1121> (in English)
8. Benajes, J., Serrano, J. R., Molina, S., & Novella, R. (2009). Potential of Atkinson cycle combined with EGR for pollutant control in a HD diesel engine. *Energy Conversion and Management*, 50(1), 174-183.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2008.08.034> (in English)
9. Brijesh, P., & Sreedhara, S. (2013). Exhaust emissions and its control methods in compression ignition engines: A review. *International Journal of Automotive Technology*, 14(2), 195-206.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s12239-013-0022-2> (in English)
10. Carnot, S. (1872). *Réflexions sur la puissance motrice du feu et sur les machines propres à développer cette puissance*. Paris: Gauthier-Villars, Imprimeur-Libraire. (in English)
11. Chen, L., Zhang, W., & Sun, F. (2007). Power, efficiency, entropy-generation rate and ecological optimisation for a class of generalized irreversible universal heatengine cycles. *Applied Energy*, 84(5), 512-525.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2006.09.004> (in English)
12. Chen, Z., Konno, M., Oguma, M., & Yanai, T. (2000). Experimental study of CI natural-gas/DME homogeneous charge engine. *SAE Technical Paper Series*, 109(3), 442-451. DOI: <https://doi.org/10.4271/2000-01-0329> (in English)
13. Clarke, D., & Smith, W. J. (1997). Simulation, Implementation and Analysis of the Miller Cycle Using an Inlet Control Rotary Valve, Variable Valve Actuation and Power Boost. *SAE SAE Technical Paper Series*, 61-70. DOI: <https://doi.org/10.4271/970336>. (in English)
14. Cornell, S. O., & Leman, S. A. (2006). *Engine valve actuation system (Caterpillar)*, US Patent 7004122.
15. Demirci, O. K., Uyumaz, A., Saridemir, S., & Çinar, C. (2018). The Simulation, Implementation and Analysis of the Miller Cycle Using an Inlet Control Rotary Valve. *International Journal of Automotive Technology (IJAET)*, 7(3), 107-116. DOI: <https://doi.org/10.18245/ijaet.486408>. (in English)
16. Ebrahimi, R. (2011). Effects of mean piston speed, equivalence ratio and cylinder wall temperature on performance of an Atkinson engine. *Mathematical and Computer Modelling*, 53(5-6), 1289-1297.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mcm.2010.12.015> (in English)
17. Ebrahimi, R. (2012). Performance analysis of an irreversible Miller cycle with considerations of relative air-fuel ratio and stroke length. *Applied Mathematical Modelling*, 36(9), 4073-4079.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.11.031> (in English)
18. Edwards, S., Frankle, G., Wirbeleit, F., & Raab, A. (1998). The Potential of a Combined Miller Cycle and Internal EGR Engine for Future Heavy Duty Truck Applications, *SAE Technical Paper*, 1-21.
DOI: <https://doi.org/10.4271/980180> (in English)

МАШИНОБУДУВАННЯ

19. Ehleskog, M., Gjirja, S., & Denbratt, I. (2012). Effects of Variable Inlet Valve Timing and Swirl Ratio on Combustion and Emissions in a Heavy Duty Diesel Engine. *SAE Technical Paper*, 1-12.
DOI: <https://doi.org/10.4271/2012-01-1719> (in English)
20. Ebrahimi, R. (2011). Thermodynamic modeling of performance of a Miller cycle with engine speed and variable specific heat ratio of working fluid. *Computers and Mathematics with Applications*, 62, 2169-2176.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.camwa.2011.07.002> (in English)
21. Fukuzawa, Y., Kakuhama, Y., Shimoda, H., Endo, H., & Tanaka, K. (2001). Development of High Efficiency Miller Cycle Gas Engine. *Mitsubishi Heavy Industries*, 38(3), 146-150. (in English)
22. Ge, Y., Chen, L., Sun, F., & Wu, C. (2005). Effects of heat transfer and variable specific heats of working fluid on performance of a Miller cycle. *International Journal of Ambient Energy*, 26(4), 203-214.
DOI: <https://doi.org/10.1080/01430750.2005.9674991> (in English)
23. Ge, Y., Chen, L., Sun, F., & Wu, C. (2005). Effects of heat transfer and friction on the performance of an irreversible air-standard Miller cycle. *International Communications in Heat and Mass Transfer*, 32(8), 1045-1056. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.icheatmasstransfer.2005.02.002> (in English)
24. Ge, Y., Chen, L., Sun, F., & Wu, C. (2005). Reciprocating heat-engine cycles. *Applied Energy*, 81(4), 397-408.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2004.09.007> (in English)
25. Gonca, G., & Hocaoglu, M. F. (2019). Performance Analysis and Simulation of a Diesel-Miller Cycle (DiMC) Engine. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 44, 5811-5824.
DOI: <https://doi.org/10.1007/s13369-019-03747-4> (in English)
26. Gonca, G., Sahin, B., & Ust, Y. (2015). Investigation of Heat Transfer Influences on Performance of Air-Standard Irreversible Dual-Miller Cycle. *Journal of Thermophysics and Heat Transfer*, 29(4), 678-683.
DOI: <https://doi.org/10.2514/1.T4512> (in English)
27. Goto, T., Hatamura, K., Takizawa, S., Hayama, N., Abe, H., & Kanesaka, H. (1994). Development of V6 Miller Cycle Gasoline Engine. *SAE Technical Paper*, 1-11. DOI: <https://doi.org/10.4271/940198> (in English)
28. Grab-Rogaliński, K., Szwaja, S., & Tutak, W. (2014). The Miller Cycle Based IC Engine Fuelled with a CNG/Hydrogen. *Journal of KONES. Powertrain and Transport*, 21(4), 137-144.
DOI: <https://doi.org/10.5604/12314005.1130459> (in English)
29. Hatamura, K., Hayakawa, M., Goto, T., & Hitomi, M. (1997). A study of the improvement effect of Miller-cycle on mean effective pressure limit for high-pressure supercharged gasoline engines. *JSAE Review*, 18(2), 101-106. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0389-4304\(96\)00069-0](https://doi.org/10.1016/S0389-4304(96)00069-0) (in English)
30. Heikkilä, J., Happonen, M., Murtonen, T., Lehto, K., Sarjoavaara, T., Larmi, M., ... & Virtanen, A. (2012). Study of Miller timing on exhaust emissions of a hydrotreated vegetable oil (HVO)-fueled diesel engine. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 62(11), 1305-1312.
DOI: <https://doi.org/10.1080/10962247.2012.708383>. (in English)
31. Heywood, J. B. (1988). *Ideal models of engine cycles*. Singapore: McGraw-Hill Education. (in English)
32. Higuchi, N., Sunaga, Y., Tanaka, M., & Shimada, H. (2013). Development of a New Two-Motor Plug-In Hybrid System. *SAE International Journal of Alternative Powertrains*, 2(1), 135-145.
DOI: <https://doi.org/10.4271/2013-01-1476> (in English)
33. Kong, S. C. (2007). A study of natural gas/DME combustion in HCCI engines using CFD with detailed chemical kinetics. *Fuel*, 86(10), 1483-1489. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.11.015> (in English)
34. Liu, J., & Chen, J. (2010). Optimum performance analysis of a class of typical irreversible heat engines with temperature-dependent heat capacities of the working substance. *International Journal of Ambient Energy*, 31(2), 59-70. DOI: <https://doi.org/10.1080/01430750.2010.9675103> (in English)
35. Martins, J., Uzuneanu, K., Ribeiro, B., & Jasasky, O. (2004). Thermodynamic Analysis of an Over-Expanded Engine. *SAE Technical Paper*, 1-15. DOI: <https://doi.org/10.4271/2004-01-0617> (in English)
36. Martins, M. E. S., & Lanzanova, T. D. M. (2015). Full-load Miller cycle with ethanol and EGR: Potential benefits and challenges. *Applied Thermal Engineering*, 90, 274-285.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2015.06.086> (in English)
37. Mikalsen, R., Wang, Y. D., & Roskilly, A. P. (2009) A Comparison of Miller and Otto Cycle Natural Gas Engines for Small Scale CHP Applications. *Applied Energy*, 86(6), 922-927.
DOI: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2008.09.021> (in English)
38. Miller, R. (1952, 1956). *High expansion, spark-ignited, gas burning, internal combustion engines: US Patent 2773490A*.
39. Miller, R. (1957). *Supercharged Engine: US Patent 2817322A*.

МАШИНОБУДУВАННЯ

40. Miller, R. H. (1947). Supercharging and Internal Cooling Cycle for High Output. *Transactions ASME*, 69, 453-464. (in English)
41. Miller, R. H., & Lieberherr, H. U. (1957). The Miller supercharging system for Diesel and gas engines operating characteristics. *CIMAC*, 787–803. (in English)
42. Millo, F., Gianoglio B. M., & Delneri, D. (2011). Computational Analysis of Internal and External EGR Strategies Combined with Miller Cycle Concept for a Two Stage Turbocharged Medium Speed Marine Diesel Engine. *SAE International Journal of Engines*, 4(1), 1319-1330.
DOI: <https://doi.org/10.4271/2011-01-1142> (in English)
43. Mo, H., Yongquan, H. Y., Xiaojian, M. X., & Zhuo, B. (2016). Investigations on the Potential of Miller Cycle for Performance Improvement of Gas Engine. *Global Journal of Researches in Engineering: B Automotive Engineering*, 16(1), 37-46. (in English)
44. Niculae, M., Clenci, A., Iorga-Simăn, V., & Niculescu, R. (2019). An Overview on the Miller-Atkinson Over-expansion Thermodynamic Cycle. *IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering*, 564, 1-7.
DOI: <https://doi.org/10.1088/1757-899X/564/1/012125> (in English)
45. Ribeiro, B., & Martins, J. (2007). Direct Comparison of an Engine Working under Otto, Miller and Diesel Cycles: Thermodynamic Analysis and Real Engine Performance. *SAE Technical Paper*, 1-11.
DOI: <https://doi.org/10.4271/2007-01-0261> (in English)
46. Wang, Y, Lin, L, Roskilly, A. P., Zeng, S, Huang, J, He, Y, Huang, X, Huang, H, Wei, H, Li, S, & Yang, J. (2007). An analytic study of applying Miller cycle to reduce NO_x emission from petrol engine. *Applied Thermal Engineering*, 27(11-12), 1779-1789. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2007.01.013> (in English)
47. Wu, C., Puzinauskas, P. V., & Tsai, J. S. (2003). Performance analysis and optimization of a supercharged Miller cycle Otto engine. *Applied Thermal Engineering*, 23(5), 511-521.
DOI: [https://doi.org/10.1016/S1359-4311\(02\)00239-9](https://doi.org/10.1016/S1359-4311(02)00239-9) (in English)
48. Zhao, Y, & Chen, J. (2007) Performance analysis of an irreversible Miller heat engine and its optimum criteria. *Applied Thermal Engineering*, 27, 2051-2058. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2006.12.002> (in English)

Надійшла до редколегії: 27.01.2020

Прийнята до друку: 29.05.2020

МАШИНОБУДУВАННЯ

УДК 62-231.31:621.833

Р. П. ПОГРЕБНЯК^{1*}, М. Р. ПОГРЕБНЯК^{2*}^{1*}Каф. «Прикладна механіка», Національна металургійна академія України, пр. Гагаріна, 4, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (091)9065424, ел. пошта rogrebnyakk@ukr.net, ORCID 0000-0002-4685-1818^{2*}Каф. «Автоматизація та комп'ютерні системи», Національний технічний університет «Дніпровська політехніка», пр. ім. Дмитра Яворницького, 19, Дніпро, Україна, 49005, тел. +38 (095) 499 75 01, ел. пошта mrogrebnyakk@gmail.com, ORCID 0000-0002-2961-3383

ПОШУК ТА УСУНЕННЯ ПОВТОРЮВАНИХ ЗВ'ЯЗКІВ У СХЕМІ НАПРЯМНОГО КРИВОШИПНО-ПОВЗУНКОВОГО МЕХАНІЗМУ ЗАХОПЛЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ

Мета. Автори мають на меті виконати структурний аналіз напрямного кривошипно-повзункового спареного механізму захоплювального пристрою зі змінною структурою із зовнішніми неутримувальними зв'язками. Також потрібно визначити кількість внутрішніх і зовнішніх повторюваних зв'язків у контурах механізму на різних етапах його функціонування, оцінити їхню можливу шкідливість та запропонувати способи їх зменшення. **Методика.** Досягнення поставленої мети здійснено з використанням універсальної структурної теорії механізмів Озолса для аналізу механізму захоплювального пристрою як механізму із геометричними внутрішніми й фрикційними голономними зовнішніми зв'язками. Використано внутрішню й зовнішню структурні формули Озолса. **Результати.** Одинадцятиланковий стрижньовий механізм захоплювача побудований на основі спареного центрального паралелограмного кривошипно-повзункового механізму з ведучими кривошипками. Синхронні ведучі кривошипи впливають на подовжені за повзуни шатуни, що з'єднані з повзунами та затискними елементами захоплювача, які завдяки паралелограмам здійснюють плоскопаралельний рух. Структурний аналіз виконано для двох станів механізму: до та після затискання об'єкта маніпулювання. У першому стані механізму, де прийнято, що всі кінематичні пари V класу, однорухома схема містить тринадцять внутрішніх надлишкових зв'язків. У другому стані механізму, коли діють зовнішні, зокрема й фрикційні голономні зв'язки, схема налічує додатково ще п'ять зовнішніх повторюваних зв'язків. Показано їхнє поконтурне розташування й можливі наслідки їхнього існування. **Наукова новизна.** Уперше проведено структурний аналіз захоплювального пристрою, виконаного на основі спареного кривошипно-повзункового механізму змінної структури з внутрішніми та зовнішніми зв'язками. Здійснено поконтурний аналіз, пошук та усунення у внутрішніх контурах та зменшення кількості шкідливих повторюваних зв'язків у зовнішньому контурі механізму. **Практична значимість.** Розроблено практичні рекомендації щодо зміни рухомостей кінематичних пар для усунення всіх повторюваних зв'язків у внутрішніх контурах механізму. Для зменшення кількості шкідливих повторювань зав'язків запропоновано введення самоустановлюваного розвантажувального з'єднання у зовнішній контур механізму.

Ключові слова: механічний захоплювач; структурний аналіз; рухомість механізму; повторювальні зв'язки; зовнішні зв'язки

Вступ

Відомо, що захоплювальні (захватні) пристрої (захоплювачі), як і будь-які інші механізми, мають більшу експлуатаційну надійність, якщо вони спроектовані й виконані без повторюваних (надлишкових) зв'язків у кінематичних парах. Захватні пристрої маніпуляторів, як окремі нескладні механізми з індивідуальним приводом, мають невелику кількість ланок із переважно однорухомими кінематичними парами.

Механізми без повторюваних зав'язків (ПЗ) [1, 15] мають суттєві переваги над іншими механізмами. У таких механізмах не виникають додаткові реакції, що не обумовлені дією зовнішнього технологічного навантаження, тобто вони статично визначені; вони не чутливі до незначного відхилення розмірів ланок механізму й станини, їх пружних деформацій під дією технологічного й монтажного навантаження, тому легко збираються та не потребують підгону й обкатки; вони не схильні до утворення зазорів і зношування кінематичних пар; мають нижчу вартість

МАШИНОБУДУВАННЯ

експлуатації й вищу надійність. У разі деформацій, що викликані навантаженням, температурними умовами або похибками виготовлення, ПЗ створюють значні додаткові зусилля в рухомих з'єднаннях, збільшують зношування й знижують коефіцієнт корисної дії. За неприпустимо великих деформацій ці додаткові зусилля можуть виявитися настільки значними, що механізм заклинається або руйнується.

Тому проектування й модернізацію механізмів захоплювачів необхідно здійснювати за схемами, які позбавлені шкідливих ПЗ, що гарантує отримання більш ефективного й надійного механізму. Такі механізми ще називають самоуставлюваними.

Схеми механізмів захоплювачів мають змінну структуру з різними параметрами, що змінюються на різних етапах роботи. Структурний аналіз проводять двічі – до та після затискання об'єкта маніпулювання затискними елементами захоплювача. На етапі затискання накладаються зовнішні зв'язки, у тому числі й односторонні неутримуючі [14]. Структурний аналіз окремих механізмів захоплювачів із пошуком та усуненням шкідливих ПЗ виконаний у роботах [3, 4, 14].

У роботі [2] був здійснений геометричний синтез схем напрямних кривошипно-повзункових механізмів за критерієм енергетичного індексу передачі руху та визначені оптимальні відносні параметри таких механізмів. Завершити раціональне проектування схеми повинен структурний аналіз із пошуком та усуненням ПЗ.

Одинадцятиланковий важільний механізм захоплювача побудований на основі спареного центрального паралелограмного кривошипно-повзункового механізму з ведучими кривошипами. Ведучий кривошип 1 (рис. 1, а), що нерухомо закріплений на зубчастому колесі, приводить у рух інше зубчасте колесо з нерухомо закріпленим кривошипом 6 таким чином, що кривошипи 1 і 6 обертаються з однаковою швидкістю у протилежних напрямках. Кривошипи впливають на подовжені шатунні 2 і 7, що з'єднані з повзунками 3 і 8 та затискними елементами захоплювача 5 і 10. Повзуни 3 і 8 переміщуються в напрямних станини 0. Ланки 4 і 9 утворюють паралелограми, тому рух затискних елементів захоплювача має плоскопаралельний характер.

Паралелограмні вантажозахватні механізми мають підвищену вантажопідйомність, а об'єктом маніпулювання є найчастіше деталі призматичної форми.

Численні дослідження різних схем і конструкцій захоплювачів різного призначення [5, 13, 16, 18] дозволили напрацювати корисні рекомендації з проектування таких механізмів і спрогнозувати тенденції розвитку [19]. Однак проектування схем механічних хватних пристроїв не часто супроводжується структурним аналізом і синтезом механізму. Зазвичай конструктор обмежується підрахуванням числа ступенів свободи механізму, а найважливіший структурний параметр будь-якого механізму – повторювані зв'язки, залишаються не визначеними і не вжито заходів щодо їх усунення.

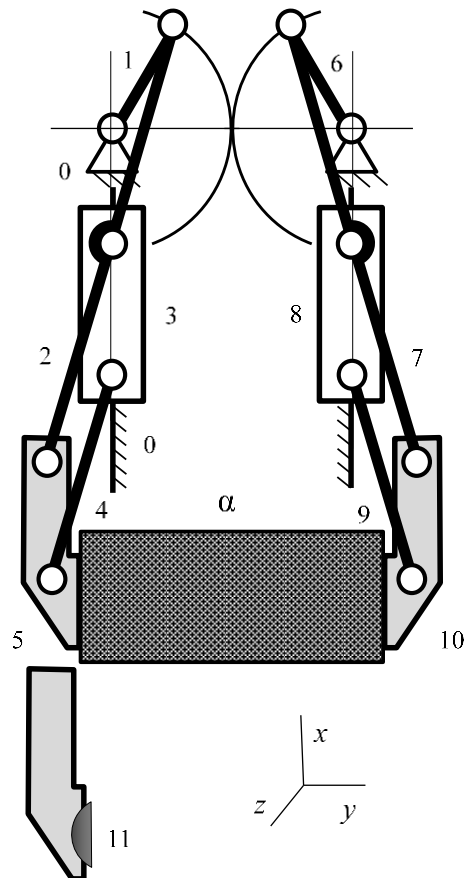


Рис. 1. Кінематична схема спареного напрямного кривошипно-повзункового механізму захоплювача

Fig. 1. Kinematic scheme of the coupled guiding slide-crank mechanism of the gripping device

МАШИНОБУДУВАННЯ

Мета

Основна мета роботи – провести структурний аналіз спареного паралелограмного кривошипно-повзункового захоплювального пристрою як механізму змінної структури, що має зовнішні неутримуючі зв'язки із визначенням кількості й розташування повторюваних зв'язків у внутрішніх і зовнішніх контурах схеми механізму, та з'ясувати способи їх зменшення.

Методика

Досягнення поставленої мети здійснено засобами теорії механізмів і машин із використанням основних положень універсальної структурної теорії Озолса для аналізу механізму захоплювального пристрою як механізму внутрішніми й зовнішніми зв'язками.

Механізм захоплювального пристрою є механізмом змінної структури, й тому його структурне дослідження проведено для кожного стану окремо з використанням зовнішніх та внутрішніх структурних залежностей. За цими залежностями відокремлено внутрішні та зовнішні повторювані зв'язки.

Із багатьох структурних формул [15] зручно користуватися формулою Озолса [1]:

$$\sigma = W + 6k - f. \quad (1)$$

Це дозволяє з'ясувати наявність ПЗ і їх розташування за контурами механізму.

Результати

Структурний аналіз із визначенням ПЗ виконують не за кінематичною схемою, а за побудованою на її основі структурною схемою [1], за схемою з використанням графів [12], теорії гвинта [11], табличним способом [15] або методом матроїдів [10].

Ведучі базові ланки на структурній схемі зображують фігурами з точковим штрихуванням або подвійними лініями для ланки у вигляді повідка. Ведучі пари зображуються подвійним концентричним колом, римськими цифрами позначений клас (число зв'язків) кінематичних пар, арабськими позначені ланки механізму.

Пласкою структурною схемою може бути зображений будь-який механізм, у тому числі й просторовий [1].

Спочатку проведемо структурний аналіз простого кривошипно-повзункового механізму притискача, що лежить в основі більш складного захватного пристрою, який ми розглядаємо. Схема складається з трьох рухомих ланок 1, 2, 3 й нерухокої стійки 0 (рис. 2), і в стані до притискання ланки 2 до стійки 0 має чотири однорухомі зв'язки. Кількість внутрішніх ПЗ знайдемо за формулою (1): у цьому одноконтурному механізмі ($k = 1$) рухомість $W = 1$, загальне число рухомостей усіх зв'язків складе $f = 4 \cdot 1 = 4$, а $\sigma = 1 + 6 \cdot 1 - 4 = 3$. У стані притискання шатуна 2 до стійки 0 у схемі утворюється ще один контур 0–2–3, а рухомість механізму зникає ($W = 0$). Якщо контакт у парі 0–2 точковий, то це зв'язання можна прийняти п'ятирухомим, а замикання пари силовим. Число рухомостей усіх зв'язків стане $f = 4 \cdot 1 + 1 \cdot 5 = 9$, а кількість ПЗ у такому двоконтурному механізмі не зміниться: $\sigma = 0 + 6 \cdot 2 - 9 = 3$ і всі вони залишаться в контурі 0–1–2–3. Якщо контакт у парі 0–2 буде пласким, а зв'язання трирухомим, то відповідно до збільшення накладених зв'язків збільшиться й кількість ПЗ.

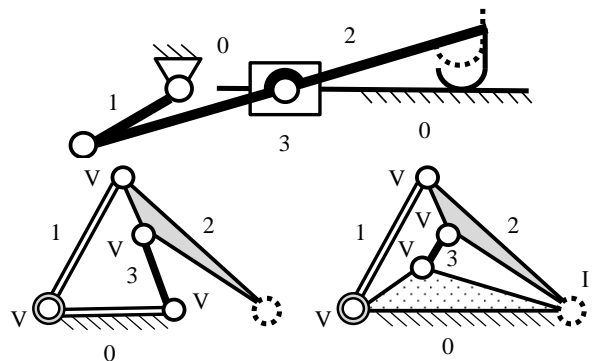


Рис. 2. Кінематична й структурні схеми кривошипно-повзункового механізму притискача

Fig. 2. Kinematic and structural schemes of the slide-crank mechanism of the gripper

Структурний аналіз затискного пристрою «КІРР К066D» з пошуком ПЗ матричним методом Девіса [11] і з їх усуненням за допомогою методу матроїдів виконано в роботі [6]; за таким же підходом автори виконали аналіз для інших механізмів [7, 8]. Навіть для простих механізмів цей шлях надто складний, хоча й дозволяє отримати всі можливі варіанти самоустановлювальних (без ПЗ) механізмів за цією схемою. Не всі варіанти можуть бути реалізовані, й остаточний

МАШИНОБУДУВАННЯ

вибір схеми та конструкції залишається за проєктувальником і є суб'єктивним. Запропонований авторами самоустановлювальний механізм затискного пристрою з п'ятирухою точковою парою в зовнішньому контурі виглядає невдалим, бо під навантаженням пара перетвориться в трирухому й поверне в схему 2 ПЗ. Можлива також поява групової рухомості в окремих положеннях стрижньового механізму, яку таким чином виявити неможливо.

Структурний аналіз захватного пристрою (рис. 1), побудованого на основі вище розглянутого механізму (рис. 2), виконаємо у два етапи за допомогою методу Озолса.

Перший етап – об'єкт маніпулювання не затиснутий. Складна симетрична одношарова напіввідкрита з сімома базовими ланками структурна схема механізму (рис. 3, а) має десять рухомих ланок ($n - 1 = 10$), п'ятнадцять з'єднань ($p = 15$) і п'ять контурів ($k = 5$, п'ятого класу). Правильність побудови структурної схеми перевіримо основною геометричною залежністю $p = n + k - 1$ ($15 = 10 + 5 - 1$).

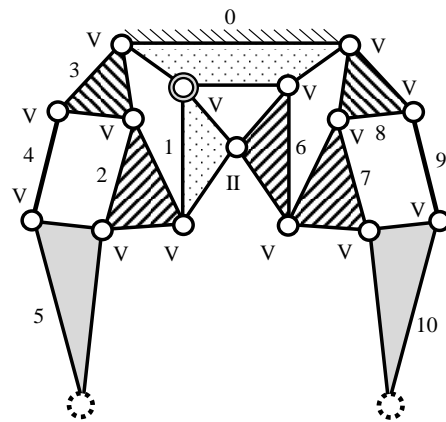
Число ступенів свободи визначимо за формулою [1]:

$$W = b + c + d, \quad (2)$$

де c – число основних рухомостей (за числом сил рушійних), b – число додаткових рухомостей (з урахуванням місцевих), d – число динамічних зв'язків. У механізмі одна ведуча ланка й одна рушійна сила, тому $c = 1$, додаткових рухомостей і динамічних зв'язків у схемі немає ($b = d = 0$), тому $W = 1$. У схемі 14 однорухомих пар V класу й одна чотирирухома пара II класу (зубчаста передача), загальна рухомість усіх 15 кінематичних пар складе $f = 14 \cdot 1 + 1 \cdot 4 = 18$.

За формулою (1) число ПЗ складе $\sigma = 1 + 6 \cdot 5 - 18 = 13$. Симетрична схема має чотири топологічно однакові контури, у яких утворюються по три ПЗ. Ще один ПЗ знаходиться в контурі 0–1–6. Можлива непаралельність і перекіс осей шарнірів і повзунка в контурах основних механізмів (0–1–2–3, 0–6–7–8) та паралелограмів (2–3–4–5, 7–8–9–10) створює внутрішнє скручування й вигин шатунів, і ці деформації будуть викликані не дією зовнішньої сили, а дією ПЗ. Один ПЗ в контурі зубчастої передачі 0–1–6 потребує точної паралельності осей шарнірів коліс.

а – а



б – б

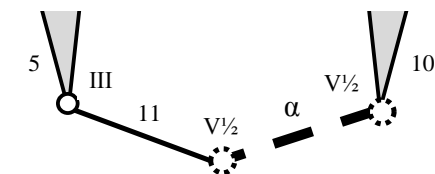
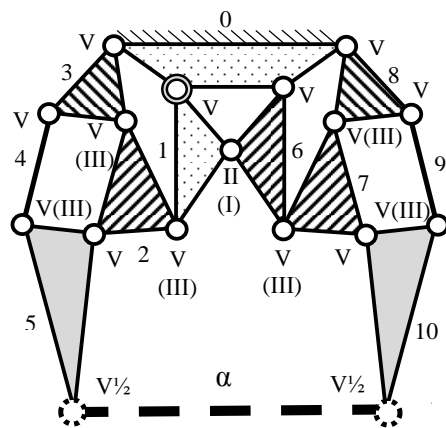


Рис. 3. Структурні схеми напрямного кривошипно-повзункового механізму захоплювача на різних етапах його роботи:

а – до затискування об'єкта; б – об'єкт затиснутий

Fig. 3. Structural schemes of the guide crank-slider mechanism of the gripper at different stages of its operation:

a – before gripping an object; b – the object is gripped

Залишення більшості ПЗ у схемі викличе напруги під час складання механізму, а під час роботи – знос та утворення зазорів у зчленуваннях.

Зменшення кількості ПЗ може бути досягнуте збільшенням рухомостей кінематичних пар. На структурній схемі у дужках (рис. 3, б) позначені рекомендовані для заміни класи кінематичних пар, які не складні до виконання

МАШИНОБУДУВАННЯ

й дозволяють позбавитися ПЗ у внутрішніх контурах. Для позбавлення ПЗ у контурі із зубчастю передачею її можна виконати з діжкоподібним зубом, що зменшить клас пари до першого. Сполуки подовжених шатунів 2 й 7 із кривошипними шарнірами III класу, а шарніри, якими вони сполучаються із затискними елементами 5 і 10, залишені однорухомими V класу. З'єднання коромисел 4 й 9 із повзунками 3 і 8 також виконані сферичними шарнірами III класу. У такій покращеній схемі загальна рухомість усіх пар тепер складе $f = 8 \cdot 1 + 6 \cdot 3 + 1 \cdot 5 = 31$, а внутрішні ПЗ у схемі тепер відсутні $\sigma = 1 + 6 \cdot 5 - 31 = 0$.

Другий етап – об'єкт маніпулювання затиснутий. Структура механізму змінилася (рис. 3, б), накладені зовнішні зв'язки між затискними елементами та об'єктом маніпулювання. Під час затискання між об'єктом та затискними елементами накладаються зовнішні зв'язки, тому згідно з [1] розглянемо два стани механізму: ізольовано від зовнішніх тіл, із якими він має зовнішні зв'язки (ізольовано від об'єкта маніпулювання), і в робочому стані, коли діють зовнішні зв'язки (об'єкт затиснутий). За діючих додатково накладених зовнішніх зв'язків механізм має робочу рухомість W_p , за усунених зовнішніх зв'язків механізм має фактичну рухомість W_ϕ . Робоча рухомість W_p менша за фактичну W_ϕ на кількість накладених зовнішніх зв'язків. Одне положення механізму відповідає стану, коли об'єкт затиснутий, інше – вільного від об'єкта маніпулювання.

Для більш точного підрахунку кількості зовнішніх ПЗ у механізмі із зовнішніми й неутримуючими зв'язками використовуємо скореговану [14] зовнішню структурну формулу:

$$\sigma_a = S_a - [(W_\phi - W_p) + W_a - S_{ai}], \quad (3)$$

тут σ_a – число зовнішніх ПЗ, W_a – зменшення рухомостей зовнішніх тіл від дії зовнішніх зв'язків, S_a – число зовнішніх зв'язків, S_{ai} – число зовнішніх зв'язків, які одночасно позбавляють рухомості зовнішнє тіло й усувають основну рухомість механізму [14].

Після затискання об'єкта маніпулювання a механізм і зовнішнє тіло повністю втрачають рухомість $W_p = 0$, і в схемі утворюється ще один

незалежний контур 1–2–5–а–10–7–б. Якщо затискні елементи плоскі, а тертя між ними й об'єктом захоплювання достатнє, і він не може рухатися відносно механізму, то в зовнішніх парах 5–а і 10–а за цих умов утворюються зв'язки $V\frac{1}{2}$ класу, де один геометричний зв'язок здійснює одностороннє обмеження руху вздовж осі у. Ще два геометричних зв'язки дозволяють передати 2 моменти навколо осей z і x , та три голономних фрикційних зв'язки [17], які здатні передати 2 сили вздовж осей z і x і момент навколо осі у. $S_{ai} = 1$ – один загальний зв'язок одночасно позбавляє рухомості об'єкт маніпулювання й усуває основну рухомість механізму.

Кількість зовнішніх ПЗ за залежністю (3) складе $\sigma_a = 11 - [(1 - 0) + 6 - 1] = 5$: три ПЗ обмежують передачу сил уздовж осей x і z і передачу моменту навколо осі у та утворюються фрикційними голономними зв'язками. Було б достатньо, щоб ці фрикційні зв'язки накладал один затискний елемент захоплювача. Два інші з виявлених зовнішніх ПЗ вимагають дотримання у двох взаємно перпендикулярних площинах паралельності поверхонь затискних елементів і бічних поверхонь об'єкта. Для їх нейтралізації без зміни форми контактуючих поверхонь доцільно ввести в схему розвантажувальне з'єднання, яке компенсує можливі перекося під час затискання об'єкта. Таким з'єднанням може бути сферична пара 10–11 (рис. 1, знизу ліворуч), після введення якої її самоустановлення компенсує можливу непаралельність бічних сторін об'єкта. Ці ПЗ особливо небезпечні тим, що їх дія під час затискання має багаторазовий динамічний характер і створює два реактивних моменти, які не викликані дією сил затискання.

Можна, якщо дозволяє технологія, використати адаптивні конструкції затискних елементів із накладками [9] або м'які захоплювачі [18], що в зовнішньому контурі накладають динамічні зв'язки, які зменшують або виключають утворення ПЗ. Такого роду динамічні зв'язки не можуть бути застосовані у внутрішніх контурах механізму, де необхідна обов'язкова однозначність положень і швидкостей ланок, яка може бути забезпечена твердими ланками.

Структурна схема механізму захоплювача, яка позбавлена шкідливих ПЗ, представлена на рис. 3, б (внизу). Фактична рухомість механізму перед накладенням зовнішніх зв'язків і після

МАШИНОБУДУВАННЯ

введення розвантажувального з'єднання складе $W_{\phi} = 1 + 3 = 4$, де до основної рухомості додаються три місцевих рухомості ланки 11. Кількість зовнішніх ПЗ суттєво зменшалась $\sigma_a = 12 - (4 - 0) - 6 = 2$, а залишені два голономних зовнішніх ПЗ, що подвійно обмежують переміщення об'єкта затискання за двома координатами у площині zOy , зменшують питомий тиск контакту, підвищують вантажопідйомність механізму захоплювача і не шкідливі.

Виконаний за запропонованою поліпшеною схемою захоплювальний пристрій, де внутрішні ПЗ відсутні, а кількість зовнішніх ПЗ мінімальна, має безумовно, більш високу надійність експлуатації.

Наукова новизна та практична значимість

Уперше проведено структурний аналіз захоплювального пристрою, виконаного на основі спареного кривошипно-повзункового механізму змінної структури з внутрішніми та зовнішніми зв'язками. Здійснено поконтурний аналіз, пошук та усунення у внутрішніх контурах та зменшення кількості шкідливих повторюваних зв'язків у зовнішньому контурі механізму.

Розроблено практичні рекомендації щодо зміни рухомостей кінематичних пар для усунення всіх повторюваних зв'язків у внутрішніх контурах та введення самоустановлювального розвантажувального з'єднання у зовнішній контур механізму.

Висновки

Від коректного визначення та усунення шкідливих повторюваних зв'язків у контурах схеми суттєво залежить надійність механізмів захоплювачів і їх правильна побудова.

Захватні пристрої із паралельними та спареними механізмами мають змінну структуру й велику кількість повторюваних зв'язків у внутрішніх та зовнішніх контурах. Для виявлення та зменшення зовнішніх повторюваних зв'язків зручно застосувати зовнішню структурну формулу О. Озолса.

Структурний аналіз механізмів захоплювачів як механізмів змінної структури повинен бути виконаний для двох станів механізму. Спочатку потрібен аналіз, пошук та усунення внутрішніх повторюваних зв'язків у схемі до затискання об'єкта маніпулювання. Потім проводяться аналіз, пошук та усунення зовнішніх повторюваних зв'язків у схемі з утворенням зовнішнім контуром між ланками механізму й об'єктом маніпулювання.

Усунення шкідливих повторюваних зв'язків у зовнішньому контурі може бути виконане за рахунок уведення розвантажувального з'єднання для компенсації перекосів поверхонь затискних елементів та об'єкта маніпулювання, зниження класу зовнішніх кінематичних пар, за рахунок використання адаптивних затискних елементів або м'яких захоплювачів.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Озол О. Г. *Основы конструирования и расчета механизмов*. Рига : Звайгзне, 1979. 360 с.
2. Погребняк Р. П., Погребняк М. Р. Кінематичний синтез прямолінійно-напрямних центральних кривошипно-повзункових механізмів захоплювального пристрою за енергетичним індексом передачі руху. *Наука та прогрес транспорту*. 2020. № 1 (85). С. 88–98. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/199726>
3. Погребняк Р. П. Пошук та усунення надлишкових зв'язків у захоплюючих пристроях (захоплювачах) механізмів маніпуляторів. *Металургійна і гірничорудна промисловість*. 2015. № 7 (296). С. 91–95.
4. Погребняк Р. П. Повторювані зв'язки у схемах стрижньового повзунко-шатуного механізму захоплювального пристрою. *Наука та прогрес транспорту*. 2018. № 4 (76). С. 81–88. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/140547>
5. Челпанов И. Б., Колпашников С. Н. Схваты промышленных роботов. Ленинград : Машиностроение, 1989. 287 с.
6. Artmann V. N., Barrett R. L. P., Martins D., Simon R. Analysis and elimination of redundant constraints in clamping devices. *25th ABCM International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2019)*. 2019. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.26678/ABCM.COBE2019.COBE2019-1340>

7. Artmann V. N., Barreto R. L., Carboni A. P., Simoni R., Martins D. Type synthesis of self-aligning mechanisms applied to the leg rest section of an hospital bed. *In IFToMM World Congress on Mechanism and Machine Science*. 2019. P. 1413–1422. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_139
8. Barreto R. L. P., Martins D., Carboni A. P., Simoni R., Dai J. S. Self-aligning analysis of the metamorphic palm of the kcl/tju metamorphic hand. *In 2018 International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots (ReMAR)*. 2018. P. 1–8. DOI: <https://doi.org/10.1109/REMAR.2018.8449886>
9. Chang C.-M., Gerez L., Elangovan N., Zisimatos A., Liarokapis M. On Alternative Uses of Structural Compliance for the Development of Adaptive Robot Grippers and Hands. *Frontiers in Neurorobotics*. 2019. Vol. 13, Art. 91. P. 1–16. DOI: <https://doi.org/10.3389/fnbot.2019.00091>
10. Carboni A. P., Simas H., Martins D. Analysis of Self-aligning Mechanisms by Means of Matroid Theory. *Mechanisms and Machine Science*. Vol. 54. P. 61–73. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-67567-1_6
11. Davies T. Freedom and constraint in coupling networks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C : Journal of Mechanical Engineering Science*. 2006. Vol. 220, No. 7. P. 989–1010. DOI: <https://doi.org/10.1243/09544062C09105>
12. Lu Yi., Ye N. J., Lu Y. Analysis and determination of associated linkage, redundant constraint, and degree of freedom of closed mechanisms with redundant constraints and/or passive degree of freedom. *ASME Journal of Mechanical Design*. 2012. Vol. 134, Iss. 6. P. 1–9. DOI: <https://doi.org/10.1115/1.4006525>
13. Monkman G. J., Hesse S., Steinmann R., Schunk H. *Robot grippers*. Weinheim : Wiley-VCH, 2007. 463 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/9783527610280>
14. Pogrebnyak R. P. Structural analysis and rational design parallelogram arm gripping device. *Theory and practice steel industry*. 2015. № 1/2. P. 123–125.
15. Reshetov L. *Self-Aligning Mechanisms* : Reference book / Transl. from Russian by L. Sachs. Moscow : Mir, 1986. 528 p.
16. *Robot Grippers (International trends in manufacturing technology)*. Ed. by Pham D. T., Haginbotham W. B. Bedford : IFS, 1986. 443 p.
17. Schlenoff C., Balakirsky S., Christensen H. Robust grasp preimages under unknown mass and friction distributions. *Integrated Computer-Aided Engineering*. 2018. Vol. 25, Iss. 2. P. 99–110. DOI: <https://doi.org/10.3233/ICA-180568>
18. Shintake J., Cacucciolo V., Floreano D., Shea H. Soft Robotic Grippers. *Advanced Materials*. 2018. Vol. 30, Iss. 29. P. 1–33. DOI: <https://doi.org/10.1002/adma.201707035>
19. Tai K., El-Sayed A. R., Shahriari M., Biglarbegian M., Mahmud S. State of the Art Robotic Grippers and Applications. *Robotics*. 2016. Vol. 5, Iss. 11. P. 1–20. DOI: <https://doi.org/10.3390/robotics5020011>

Р. П. ПОГРЕБНЯК^{1*}, М. Р. ПОГРЕБНЯК^{2*}

^{1*}Каф. «Прикладная механика», Национальная металлургическая академия Украины, пр. Гагарина, 4, Днипро, Украина, 49005, тел. +38 (091) 906 54 24, эл. почта pogrebnyakk@ukr.net, ORCID 0000-0002-4685-1818

^{2*}Каф. «Автоматизация и компьютерные системы», Национальный технический университет «Днепропетровская политехника», пр. им. Дмитрия Яворницкого, 19, Днипро, Украина, 49005, тел. +38 (095) 499 75 01, эл. почта mpogrebnyakk@gmail.com, ORCID 0000-0002-2961-3383

ПОИСК И УСТРАНЕНИЕ ПОВТОРЯЮЩИХСЯ СВЯЗЕЙ В СХЕМЕ НАПРАВЛЯЮЩЕГО КРИВОШИПНО-ПОЛЗУНКОВОГО МЕХАНИЗМА ЗАХВАТЫВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА

Цель. Авторы имеют целью провести структурный анализ направляющего кривошипно-ползункового парного механизма захватывающего устройства переменной структуры с внешними неустойчивыми связями. Также нужно определить количество внутренних и внешних повторяющихся связей в контурах механизма на разных этапах его функционирования, оценить их возможную вредность и предложить способы их уменьшения. **Методика.** Достижение поставленной цели осуществлено на основе универсальной структурной теории механизмов Озолса для анализа механизма захвата как механизма с геометрическими, внутренними и фрикционными голономными внешними связями. Используются внутренняя и внешняя структурные формулы Озолса. **Результаты.** Одиннадцатизвенный стержневой механизм захвата построен на основе

МАШИНОБУДУВАННЯ

спареного центрального паралелограмного кривошипно-ползункового механізму з ведучими кривошипами. Синхронні ведучі кривошипи впливають на удлиннені за ползуни шатуни, з'єднані з ползунами і зажимними елементами захвата, які завдяки паралелограмам здійснюють плоско-паралельне рухання. Структурний аналіз виконаний для двох станів механізму: до і після зажима об'єкта маніпулювання. В першому стані механізму, де прийнято, що всі кінематичні пари V класу, одноподвижна схема містить тринадцять внутрішніх избыточних зв'язей. Во другому стані механізму, коли діють зовнішні, в тому числі і фрикційні голономні зв'язі, в схемі утворюється додатково ще п'ять зовнішніх повторюючих зв'язей. Показано їх поконтурне розташування і можливі наслідки їх дії. **Научна новизна.** Вперше проведено структурний аналіз захоплюючого пристрою, виконаного на основі спареного кривошипно-ползункового механізму змінної структури з внутрішніми і зовнішніми зв'язями. Виконано поконтурний аналіз, пошук і усунення в внутрішніх контурах і зменшення кількості шкідливих повторюючих зв'язей в зовнішньому контурі механізму. **Практична значимість.** Розроблено практичні рекомендації по зміні подвижностей кінематичних пар для усунення всіх повторюючих зв'язей в внутрішніх контурах механізму. Для зменшення кількості шкідливих повторюючих зв'язей пропонується введення самоуставлюючогося роз'єднувача в зовнішній контур механізму.

Ключові слова: механічний захват; структурний аналіз; подвижність механізму; повторюючі зв'язі; зовнішні зв'язі

R. P. POGREBNIYAK^{1*}, M. R. POHREBNIYAK^{2*}

^{1*}Dep. «Applied Mechanics», National Metallurgical Academy of Ukraine, Naharina Av., 4, Dnipro, Ukraine, 49005, tel. +38 (091) 906 54 24, e-mail pogrebnyakk@ukr.net, ORCID 0000-0002-4685-1818

^{2*}Dep. «Automation and Computer Systems», National Technical University «Dnipro Polytechnic», Dmytra Yavornytskoho Av., 19, Dnipro, Ukraine, tel. +38 (095) 499 75 01, e-mail mpogrebnyakk@gmail.com, ORCID 0000-0002-2961-3383

SEARCH AND ELIMINATION OF REPEATED CONNECTIONS IN THE SCHEME OF GUIDING SLIDE-CRANK MECHANISM OF THE GRIPPING DEVICE

Purpose. The article is aimed to carry out a structural analysis of the coupled straight-guiding crank-slide mechanism of variable structure gripping devices with external unilateral constraints. It is also necessary to determine the number of internal and external repeating connections in the contours of the mechanism at different stages of its functioning, to assess their possible perniciousness and to suggest ways to reduce them. **Methodology.** Achieving this goal is carried out based on the universal structural theory of Ozols mechanisms for analyzing the gripping device as a mechanism with geometric, internal and frictional holonomic external constraints. Ozols internal and external structural formulas are used. **Findings.** The eleven-link gripping device is built on the basis of coupled central parallelogram crank-slider mechanism with a driving cranks. Synchronous driving cranks act on elongated connecting rods connected to sliders and gripping clamp elements. Gripping clamp elements carry out plane-parallel movement. Structural analysis was performed using structural schemes for two states of the mechanism: before clamping the object and in the state of the clamped object. In the first state of the mechanism with kinematic pairs of class V, the one-movable scheme contains thirteen internal redundant constraints. In the second state of the mechanism, external constraints act and in the scheme another five additional external repeating constraints are formed. Their contour arrangement and possible consequences of their action are shown. **Originality.** Structural analysis of the coupled crank-slider mechanism of the gripping device as a mechanism of a variable structure with internal and external connections is carried out for the first time. It is performed contour analysis, search and elimination, as well as reduction of pernicious repeated connections in the internal and external contour of the mechanism. **Practical value.** Practical recommendations have been developed on changing the mobilities of sliding pairs to eliminate all repeated connections in the internal contours of the mechanism. To reduce the number of pernicious repeated connections, the introduction of a self-centering unloading coupling into the external contour of the mechanism is proposed.

Keywords: mechanical gripping device; structural analysis; mobility of mechanism; repeated connections; external connections

REFERENCES

1. Ozol, O. G. (1979). *Osnovy konstruirovaniya i rascheta mekhanizmov*. Riga: Zvaygzne. (in Russian)
2. Pogrebnyak, R. P., & Pohrebniak, M. R. (2020). Kinematic synthesis of the guide bearing central slide-crank mechanism of the gripping device based on the energetic motion transmission index. *Science and Transport Progress*, 1(85), 88-98. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/199726> (in Ukrainian)
3. Pogrebnyak, R. P. (2015). Poshuk ta usunennya nadlishkovikh zv'yazkiv u zakhoplyuyuchykh pristryakh(zakhoplyuvachakh) mekhanizmiv manipulyatoriv. *Metallurgicheskaya i gornorudnaya promyshlennost* 7(296), 91-95. (in Ukrainian)
4. Pogrebnyak, R. P. (2018). Repeated connections in the schemes of link slider-crank mechanism of gripping device. *Science and Transport Progress*, 4(76), 81-88. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/140547> (in Ukrainian)
5. Chelpanov, I. B., & Kolpashnikov, S. N. (1989). *Skhvaty promyshlennykh robotov*. Leningrad: Mashinostroyeniye. (in Russian)
6. Artmann, V. N., Barrett, R. L. P., Martins, D., & Simon, R. (2019) Analysis and elimination of redundant constraints in clamping devices. *25th ABCM International Congress of Mechanical Engineering (COBEM 2019)*, 1-10. DOI: <https://doi:10.26678/ABCM.COBEM2019.COB2019-1340> (in English)
7. Artmann, V. N., Barreto, R. L., Carboni, A. P., Simoni, R., & Martins, D. (2019). Type synthesis of self-aligning mechanisms applied to the leg rest section of an hospital bed. *In IFToMM World Congress on Mechanism and Machine Science*, 1413-1422. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-030-20131-9_139 (in English)
8. Barreto, R. L. P., Martins, D., Carboni, A. P., Simoni, R., & Dai, J. S. (2018). Self-aligning Analysis of the Metamorphic Palm of the KCL/TJU Metamorphic Hand. *2018 International Conference on Reconfigurable Mechanisms and Robots (ReMAR)*, 1-8. DOI: <https://doi:10.1109/REMAR.2018.8449886> (in English)
9. Chang, C.-M., Gerez, L., Elangovan, N., Zisimatos, A., & Liarokapis, M. (2019), On Alternative Uses of Structural Compliance for the Development of Adaptive Robot Grippers and Hands. *Frontiers in Neurorobotics*, 13(91), 1-16. DOI: <https://doi:10.3389/fnbot.2019.00091>(in English)
10. Carboni, A. P., Simas, H., & Martins, D. (2017). Analysis of Self-aligning Mechanisms by Means of Matroid Theory. *Mechanisms and Machine Science*, 54, 61-73. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-67567-1_6 (in English)
11. Davies, T. (2006). Freedom and constraint in coupling networks. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science*, 220(7), 989-1010. DOI: <https://doi:10.1243/09544062C09105> (in English)
12. Lu, Yi., Ye, N. J., & Lu, Y. (2012). Analysis and determination of associated linkage, redundant constraint, and degree of freedom of closed mechanisms with redundant constraints and/or passive degree of freedom. *ASME Journal of Mechanical Design*, 134(6), 1-9. DOI: <https://doi:10.1115/1.4006525> (in English)
13. Monkman, G., Hesse, S., Steinmann, R., & Schunk, H. (2007). *Robot grippers*. Weinheim: Wiley-VCH. DOI: <https://doi:10.1002/9783527610280> (in English)
14. Pogrebnyak, R. P. (2015). Structural analysis and rational design parallelogram arm gripping device. *Theory and Practice Steel Industry*, 1-2, 123-125. (in English)
15. Reshetov, L. (1986). *Self-Aligning Mechanisms: Reference book*. (Sachs L. (transl.)). Moscow: Mir. (in English)
16. Pham, D. T., & Haginbotham, W. B. (Eds.). (1986). *Robot Grippers (International trends in manufacturing technology)*. Bedford: IFS. (in English)
17. Schlenoff, C., Balakirsky, S. & Christensen, H. (2018). Robust grasp preimages under unknown mass and friction distributions. *Integrated Computer-Aided Engineering*, 25(2), 99-110. DOI: <https://doi:10.3233/ICA-180568> (in English)
18. Shintake, J., Cacucciolo, V., Floreano, D., & Shea, H. (2018). Soft Robotic Grippers. *Advanced Materials*, 30(29), 1-33. DOI: <https://doi:10.1002/adma.201707035> (in English)
19. Tai, K., El-Sayed, A.R., Shahriari, M., Biglarbegian, M., & Mahmud, S. (2016). State of the Art Robotic Grippers and Applications. *Robotics*, 5(11), 1-20. DOI: <https://doi:10.3390/robotics5020011>(in English)

Надійшла до редколегії: 21.01.2020

Прийнята до друку: 22.05.2020

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 656.25:657.6

М. О. БУЛАХ^{1*}

^{1*}Каф. «Управління експлуатаційною роботою», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 70, ел. пошта bulah_marina@ukr.net, ORCID 0000-0003-4264-2303

УДОСКОНАЛЕННЯ МЕТОДИКИ ОЦІНКИ СТАНУ БЕЗПЕКИ РУХУ ПОЇЗДІВ НА ЗАЛІЗНИЦІ

Мета. Зважаючи на те, що наявна в Україні методика оцінки рівня безпеки руху поїздів не забезпечує отримання реальної та адекватної картини, а закордонний досвід не відкриває можливостей аналогічного вирішення проблем на українських залізницях, метою роботи є вдосконалення методики оцінки стану безпеки руху поїздів на залізниці. **Методика.** Для вдосконалення методики оцінки стану безпеки руху поїздів на залізниці під час проведення технічного аудиту запропоновано використовувати чотири показники: кількість транспортних подій, на які нараховані збитки; кількість нещасних випадків; кількість транспортних подій, які відбулися протягом року, проте їх наслідки не пов'язані з фінансовими збитками; кількість порушень, що були виявлені ревізорами з безпеки руху. **Результати.** Виконано вдосконалення методики оцінки стану безпеки руху поїздів на залізниці. При цьому для розрахунку рівня безпеки руху поїздів введено чотири показники, з подальшим виконанням їх ранжирування. На основі статистичних даних за взятими показниками, була отримана математична модель інтегральної оцінки безпеки руху поїздів, за допомогою якої виконано порівняльну оцінку безпеки руху в АТ «Укрзалізниця». Як результат, слід відзначити, що динаміка стану безпеки руху у 2015–2018 рр. має іншу картину порівняно зі звичайною кількістю транспортних подій в АТ «Укрзалізниця». Удосконалена методика оцінки стану безпеки руху поїздів на залізниці дозволяє виконати адекватні розрахунки та встановити реальний стан безпеки руху під час проведення технічного аудиту. **Наукова новизна.** Удосконалено методику оцінки стану безпеки руху поїздів на залізниці, яка може бути застосована під час проведення технічного аудиту. **Практична значимість.** Зазначена методика дозволяє виконувати оцінювання загального рівня безпеки руху поїздів та встановлювати в процесі технічного аудиту реальні загрози й ризики, які в подальшому можуть бути усунуті шляхом розробки відповідних заходів і дій.

Ключові слова: залізничний транспорт; безпека руху; технічний аудит; процеси перевезення; комплексний показник

Вступ

У сучасних умовах розвитку суспільства транспорт і транспортна інфраструктура займають одне з найважливіших місць у сфері послуг. Незважаючи на те, що ця складова сфери не пов'язана зі створенням безпосередніх матеріальних цінностей, її роль не можна заперечувати з огляду на багатогранність виконуваних функцій [13]. Забезпечення потреб населення та

економічних суб'єктів можливостями обміну не тільки матеріальними, але й духовними цінностями як на державному, так і на міжнародному рівнях надають транспорту особливого значення та створюють передумови для того, щоб його розвиток став одним із пріоритетних завдань країни.

Транспорт не тільки підвищує якість життя людини, але й часто рятує його, особливо в критичних умовах: хвороба, нещасний випа-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

док, стихійне лихо, надзвичайна ситуація тощо. Проте неможливо та недоцільно розглядати транспорт виключно як «рятівника» та відхилити ймовірність його причетності до створення критичних умов.

На тлі інших видів транспорту залізничний – найбільш безпечний, що становить одну з його головних переваг. Проте ця перевага формується з багатьох факторів, одним із яких є постійна робота над забезпеченням безпечних умов функціонування.

Науковці та фахівці всього світу динамічно працюють над розробкою власних або адаптацією закордонних методів і методик забезпечення безпеки руху на залізничному транспорті [8, 10–12], а також над пошуком підходів її оцінки [14–16]. Не останнє місце в цьому процесі займає вивчення світової практики.

Серед українських науковців досить жваво обговорюється питання оцінки стану безпеки на залізничному транспорті, проте майже всі роботи мають певну спеціалізовану спрямованість. Так, у роботі [9] автори описали методику формування показника, який відображає загальний рівень стану безпеки в локомотивному господарстві. Автори [4] безпеку руху на залізничному транспорті розглядають під кутом взаємодії колії та рухомого складу. Робота [1] присвячена проблемним питанням безпеки руху під час організації міжнародних вантажних перевезень. Крім цього, ряд робіт [2, 3, 5] присвячено безпеці руху на залізничних переїздах.

Аналіз вищезгаданих робіт свідчить про те, що питання забезпечення безпеки руху на залізничному транспорті та підвищення її рівня є не тільки актуальним в Україні і світі, але й включає широке коло завдань, для вирішення яких потрібні подальші дослідження.

Для реалізації законодавчо закріплених методів оцінки стану безпеки на залізничному транспорті України сьогодні застосовують абсолютні показники, такі як [6, 7]: кількість транспортних подій та кількість постраждалих осіб, що загинули або були травмовані в їх результаті; питомі показники – кількість транспортних подій на 1 млн приведених т.км та кількість загиблих і травмованих на 100 подій.

Аналіз зазначених показників указує на те, що протягом 2010–2018 рр. у динаміці першого

показника відзначається щорічне зменшення кількості транспортних подій. Загальний рівень зниження показника протягом розглянутих років складає майже 40 %. Аналогічне зменшення характерне і для відповідного питомого показника. Оскільки абсолютний показник кількості осіб, що загинули в результаті транспортної події протягом аналізованого періоду відсутній, розрахунок відповідного питомого показника неможливий. Аналіз наступного показника, а саме кількості травмованих осіб, свідчить про його відсутність у 2013–2014 рр., на тлі якої у 2017 році, у зв'язку з допущенням катастрофи, відбулося значне зростання. На фоні цього факту для подальшої динаміки цього показника стане характерним його зменшення.

Зважаючи на те, що політикою АТ «Укрзалізниця» підвищення безпеки руху визначено як один із пріоритетних напрямів діяльності, а також враховуючи малоінформативність розглянутих показників, інтегровані звіти товариства насичені додатковими показниками, проте, як правило, кожен із них свідчить про стійку динаміку зниження аварійності. Загальні позитивні обставини підвищення стану безпеки руху надійно підкріплені інформацією про обсяги капіталовкладень на оновлення й капітальний ремонт рухомого складу та інфраструктури, а також підвищення кваліфікації працівників, у тому числі і з питань безпеки руху. Безперечно, ці заходи мають неабиякий вплив на підвищення безпеки, але іноді їх висвітлення викликає ще більше питань. З іншого боку, зрозуміло, що у випадку, коли підприємство не зобов'язане оприлюднювати певні дані та має право вибору, обрані будуть тільки ті з них, які поліпшують загальну картину. Проте розглядаючи одні й ті самі показники під різними кутами зору, можемо дійти іншого висновку.

Наприклад, АТ «Укрзалізниця» відзначає зниження кількості транспортних подій протягом 2010–2018 рр., відповідне зменшення кількості транспортних подій на 1 млн т.км та на добу тощо. Проте аналіз динаміки цього показника відносно до середньооблікової кількості працівників експлуатаційної роботи показує зовсім іншу картину (рис. 1).

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

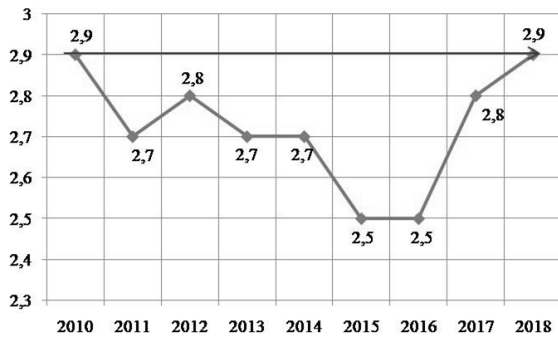


Рис. 1. Кількість транспортних подій на залізничному транспорті в розрахунку на тисячу працівників експлуатаційної роботи у 2010–2018 рр.

Fig. 1. The number of transport accidents at railway transport per thousand employees of operational work in 2010–2018.

Дані, наведені на рис. 1, свідчать про те, що кількості транспортних подій у розрахунку на 1 тис. працівників, характерні деякі коливання в бік зменшення; у 2018 році – значення цього показника повернулося на рівень 2010 року, незважаючи на реалізацію вищенаведених заходів. Таким чином, реальна картина стану безпеки руху в АТ «Укрзалізниця» має зовсім інший вигляд.

У роботі [6] розроблено методику інтегральної оцінки стану безпеки руху поїздів в умовах АТ «Укрзалізниця» для проведення технічного аудиту. На основі наведеної роботи покажемо можливість розширення запропонованої методики з наступним її вдосконаленням.

Мета

Зважаючи на те, що наявна в Україні методика оцінки рівня безпеки руху поїздів не забезпечує отримання реальної та адекватної картини, а закордонний досвід не відкриває можливостей аналогічного вирішення проблем на українських залізницях, метою роботи є вдосконалення методики оцінки стану безпеки руху поїздів на залізниці, що дозволить з'ясувати рівень фактичної та прогнозованої безпеки.

Методика

Для використання підходу, запропонованого в роботі [6], оберемо показники, які не використовуються АТ «Укрзалізниця» для аналізу стану безпеки руху, а саме: кількість транспор-

тних подій, на які не нараховані збитки (I), кількість транспортних подій, на які нараховані збитки (II), кількість нещасних випадків на виробництві (III) та кількість порушень, що були виявлені ревізорами з безпеки руху (IV).

Проведення подальшої оцінки вимагає визначення рівня значущості або величину впливу показника. Для цього застосуємо метод ранжирування з такими критеріями:

- шкода життю та здоров'ю людини;
- шкода навколишньому середовищу;
- фінансові витрати на ліквідацію наслідків;
- прямі збитки від пошкодження основних засобів;
- частота виникнення фактора.

Оскільки дані ранжирування будуть використані для встановлення значущості показника під час проведення подальших розрахунків, застосуємо шкалу цифрових значень від 1 до 4, де число 1 відповідає першому місцю в черзі та присвоюється показнику, який має найменшу суму за критеріями оцінки.

Результати ранжирування наведено в табл. 1.

Таблиця 1

Результати ранжирування показників за критеріями оцінки

Table 1

The results of ranking indicators by evaluation criteria

Критерії оцінки	I	II	III	IV
Шкода життю та здоров'ю людини	3	2	1	4
Шкода навколишньому середовищу	2	1	4	3
Фінансові витрати ліквідацію наслідків дії показника	3	2	1	4
Збитки від пошкодження основних засобів	4	1	2	3
Частота виникнення	2	3	4	1
Сума значень	36	;	34	37
Порядковий номер для проведення подальших розрахунків	3	1	2	4

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Таким чином, узяті показники будемо розглядати в порядку результатів даних табл. 1.

Ураховуючи те, що три з обраних показників можна розглядати як події, що фактично відбулися, тобто мали місце в певний період часу і в певному місці, для адекватності проведення розрахунків визначимо можливість переходу четвертого показника до категорії обраних подій. Для цього визначимо ймовірність переходу порушень, що були виявлені ревізорами з безпеки руху, до категорії реальних транспортних подій за такою формулою:

$$P = \frac{A}{A+k}, \quad (1)$$

де A – кількість транспортних подій; k – кількість порушень, що були виявлені ревізорами з безпеки руху.

Для визначення кількості порушень, які могли перейти до категорії реальних транспортних подій, застосуємо формулу:

$$N = k \times P, \quad (2)$$

У табл. 2 наведено вихідні дані показників АТ «Укрзалізниця» за 2015–2018 рр., що будуть використані для подальших розрахунків.

Таблиця 2

Вихідні показники безпеки руху поїздів в АТ «Укрзалізниця» за 2015–2018 рр.

Table 2

Initial indicators of train safety in Ukrzaliznytsia JSC for 2015-2018.

Рік	II, од.	III, од.	I, од.	IV (визначено за (1) і (2)), од.
	x_1	x_2	x_3	x_4
2015	180	69	422	600
2016	144	71	406	549
2017	178	79	363	540
2018	192	61	289	480

Оскільки необхідно провести аналіз стану безпеки руху за декілька років, визначимо кількість рівнів із використанням формули Стерджеса:

$$n = 1 + 3,322 \times \lg T, \quad (3)$$

де T – аналізований період часу; $n = 1 + 3,322 \times \lg 4 = 3$.

Кількість рівнів беремо рівним $n = 3$. Для всіх наведених показників у табл. 2 період часу однаковий, у зв'язку з чим кількість груп також буде однакою.

Діапазон необхідного інтервалу відповідно до [6] визначаємо за формулою:

$$h_i = \frac{x_i^{\max} - x_i^{\min}}{n}, \quad (4)$$

де x_i^{\max} , x_i^{\min} – відповідно максимальне й мінімальне значення i -го показника стану безпеки руху поїздів.

Результати

Виконаємо розрахунок діапазонів усіх інтервалів показників безпеки руху поїздів за наведеною формулою (4), а результати подамо в табл. 3.

Таблиця 3

Діапазони інтервалів показників безпеки руху поїздів

Table 3

Ranges of intervals of traffic safety indicators of the trains

h_1	h_2	h_3	h_5
16,00	6,00	44,33	40,00

Визначивши діапазони інтервалів показників безпеки руху поїздів, побудуємо залежності показників за роками з розподіленням за рівнями. Результати наведено на рис. 2–5.

Для встановлення єдиного значення показника безпеки руху поїздів в АТ «Укрзалізниця» використаємо принцип критерію мінімуму його дисперсії, урахувавши при цьому коефіцієнти ваги для всіх, наведених у табл. 2, показників щоб з'ясувати інтегральну оцінку під час проведення технічного аудиту.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

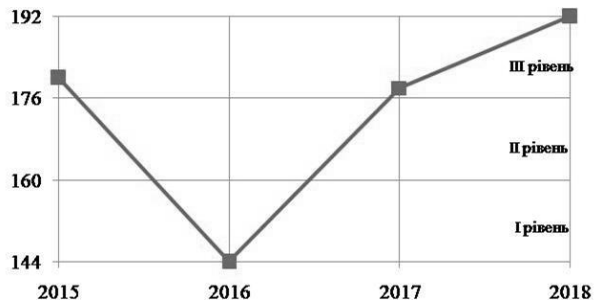


Рис. 2. Залежність кількості транспортних подій, на які нараховані збитки в АТ «Укрзалізниця» за роками з розподіленням за рівнями

Fig. 2. Dependence of the transport accidents number on which losses are accrued in Ukrzaliznytsia JSC by years with distribution by levels

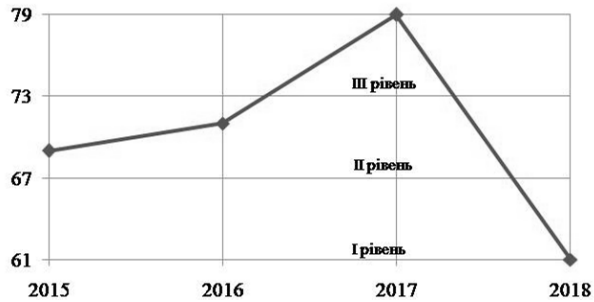


Рис. 3. Залежність кількості нещасних випадків в АТ «Укрзалізниця» за роками з розподіленням за рівнями

Fig. 3. Dependence of the accidents number in Ukrzaliznytsia JSC by years with distribution by levels

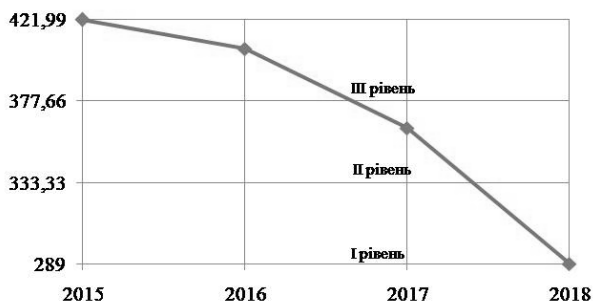


Рис. 4. Залежність кількості транспортних подій за роками, що сталися в АТ «Укрзалізниця», але до фінансових збитків не призвели, із розподіленням за рівнями

Fig. 4. Dependence of the number of transport accidents by years that occurred in Ukrzaliznytsia JSC, but did not result in financial losses, with the distribution by levels

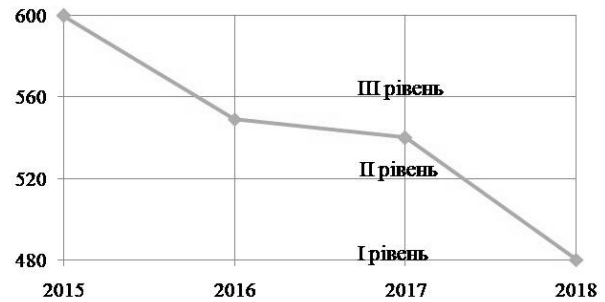


Рис. 5. Залежність кількості порушень, що були виявлені ревiзорами з безпеки руху за роками з розподіленням за рівнями

Fig. 5. Dependence of the number of violations detected by traffic safety auditors by years with distribution by levels

Прийнято вважати, що інтегральному показнику характерна деяка лінійна комбінація відповідних установлених рівнів показників безпеки руху поїздів, яку можна записати таким чином:

$$I_p = \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_n x_n = \sum_{i=1}^n \beta_i x_i, \quad (5)$$

де β_i – вагові коефіцієнти рівня для відповідного i -го показника безпеки руху поїздів, причому $\sum_{i=1}^n \beta_i = 1$; n – кількість досліджуваних показників безпеки руху поїздів.

Кожний показник x_i характеризується відповідною оцінкою значущості, яка визначаємо ранжуванням за спаданням (для взятих і розглянутих показників $x_1 > x_2 > x_3 > x_4$), із подальшим визначенням вагових коефіцієнтів β_i .

Вагові коефіцієнти β_i можуть бути визначені за допомогою шкали Фішберна:

$$\beta_i = \frac{2(k-i+1)}{k(k+1)}, \quad (6)$$

де k – взята кількість показників (табл. 1, 2)

Тоді відповідно до наведеного виразу (6) вагові коефіцієнти для обмежених рівнів чотирьох параметрів дорівнюватимуть:

$$\beta_1 = 0,4; \beta_2 = 0,3; \beta_3 = 0,2; \beta_4 = 0,1.$$

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

У результаті отримаємо вираз для інтегральної оцінки безпеки руху поїздів:

$$I_p = 0,4x_1 + 0,3x_2 + 0,2x_3 + 0,1x_4. \quad (7)$$

За отриманими рівнями показників безпеки руху поїздів в АТ «Укрзалізниця» (рис. 2–4) та розрахованими значеннями вагових коефіцієнтів виконаємо обчислення інтегральної оцінки ризику або комплексного показника стану безпеки руху поїздів із використанням формули (7). Результати порівняно із загальною кількістю транспортних подій в АТ «Укрзалізниця» та наведено на рис. 6.

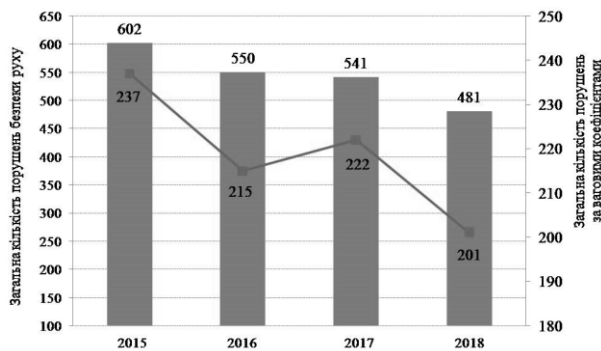


Рис. 6. Залежність інтегральної оцінки комплексного показника стану безпеки руху поїздів порівняно із загальною кількістю транспортних подій в АТ «Укрзалізниця»

Fig. 6. Dependence of the integral estimate of the complex indicator of the train safety state compared to the total number of transport accidents in Ukrzaliznytsia JSC

За рис. 6 можемо спостерігати, що інтегральна оцінка комплексного показника стану безпеки руху поїздів порівняно із загальною кількістю транспортних подій в АТ «Укрзалізниця» є більш адекватною та не має стійкої тенденції до зниження, оскільки враховує вплив на безпеку руху не одного, а декількох показників.

Наукова новизна та практична значимість

Набула подальшого розвитку методика оцінки стану безпеки руху поїздів на залізниці, яка може бути застосована під час проведення технічного аудиту. Удосконалена методика дозволяє виконувати оцінювання загального рівня безпеки руху поїздів та встановлювати в процесі аудиту реальні загрози й ризику, які, в подальшому можуть бути усунуті шляхом розробки відповідних заходів і дій.

Висновки

У роботі виконано вдосконалення методики оцінки стану безпеки руху поїздів на залізниці. При цьому введено та проранжировано для розрахунку рівня безпеки руху поїздів чотири показники: кількість транспортних подій, на які нараховані збитки; кількість нещасних випадків; кількість транспортних подій, які відбулися протягом року проте їх наслідки не пов'язані з фінансовими збитками; кількість порушень, що були виявлені ревизорами з безпеки руху. Використовуючи статистичні дані за взятими показниками, отримано математичну модель інтегральної оцінки безпеки руху поїздів, на основі якої виконано порівняльну оцінку безпеки руху в АТ «Укрзалізниця». Як результат, слід відзначити, що динаміка стану безпеки руху у 2015–2018 рр. має іншу картину порівняно із звичайною кількістю транспортних подій в АТ «Укрзалізниця». Удосконалена методика оцінки стану безпеки руху поїздів на залізниці дозволяє виконати адекватні розрахунки та встановити реальний стан безпеки руху.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Болжеларський Я. В. Проблемні питання безпеки руху у міжнародних вантажних залізничних перевезеннях. *Транспортні системи і технології перевезень*. 2019. № 18. С. 5–15. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2019/182576>
2. Возняк О. М., Гаврилюк В. І. *Забезпечення безпеки руху на залізничних переїздах*: монографія. Дніпро: ДНУЗТ, 2019. 282 с.
3. Возняк О. М. Оцінка стану безпеки руху на залізничних переїздах. *Електромагнітна сумісність та безпека на залізничному транспорті*. 2015. № 10. С. 69–76. DOI: <https://doi.org/10.15802/ecsrt2015/73859>

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

4. Кузишин А. Я., Батіг А. В. Аналіз існуючих підходів щодо розрахунку критеріїв безпеки руху на залізничному транспорті. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*. 2018. № 4 (6). P. 50–56. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2018.6.050>
5. Лужицький О. Ф. Забезпечення безпеки руху на залізничних переїздах. *Українська залізниця*. 2016. № 7 (37). С. 52–56.
6. Окороків А. М., Булах М. О. Інтегральна оцінка стану безпеки руху поїздів на залізниці під час технічного аудиту. *Наука та прогрес транспорту*. 2019. № 5 (83). С. 99–107. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/184389>
7. Окороків А. М., Булах М. О. Розширення цілей практичного застосування технічного аудиту на підприємствах залізничного транспорту. *Наука та прогрес транспорту*. 2017. № 6 (72). С. 30–39. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/117551>
8. Andrić J. M., Wang J., Zhong R. Identifying the Critical Risks in Railway Projects Based on Fuzzy and Sensitivity Analysis : A Case Study of Belt and Road Projects. *Sustainability*. 2019. Vol. 11. Iss. 5. P. 1–18. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11051302>
9. Bodnar B., Bolzhelarskyi Ya., Ochkasov O., Hryshechka T., Černiauskaitė L. Determination of Integrated Indicator for Analysis of the Traffic Safety Condition for Traction Rolling Stock. *Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2018)*. The 12th International Scientific Conf. April 26–27 2018. Panevėžys, 2018. P. 45–54.
10. Jamshidi A., Faghih-Roohi S., Hajizadeh S., Núñez A., Babuška R., Dollevoet R., Li Z., De Schutter B. A Big Data Analysis Approach for Rail Failure Risk Assessment. *Risk Analysis*. 2017. Vol. 37. Iss. 8. P. 1495–1507. DOI: <https://doi.org/10.1111/risa.12836>
11. Leitner B. A general model for railway systems risk assessment with the use of railway accident scenarios analysis. *Procedia engineering*. 2017. Vol. 187. P. 150–159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.361>
12. Licciardello R., Baldassarra A., Vitali P., Tieri A., Cruciani M., Vasile A. N. Limits and opportunities of risk analysis application in railway systems. *Safety and Security Engineering V*. 2013. Vol. 134. P. 133–144. DOI: <https://doi.org/10.2495/safe130131>
13. Okorokov A. M., Bulakh M. O. Proposals for improving the process of forming programs of reforming the railway transport industry. *Наука та прогрес транспорту*. 2018. № 2 (74). P. 57–66. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/130463>
14. Otto A., Kellermann P., Thieken A., Mániz Costa M., Carmona M., Bubeck P. Risk reduction partnerships in railway transport infrastructure in an alpine environment. *International Journal of Disaster Risk Reduction*. 2019. Vol. 33. P. 385–397. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdr.2018.10.025>
15. Sasidharan M., Burrow M., Ghataora G., Eskandari T. A Review of Risk Management Applications for Railways. *14th International Conference of Railway Engineering – 2017*. 2017. P. 1–11. DOI: <https://doi.org/10.25084/raileng.2017.0065>
16. Smoczyński P., Kadziński A. Introduction to the risk management in the maintenance of railway tracks. *Journal of mechanical and transport engineering*. 2016. Vol. 68, No 4. P. 65–80. DOI: <https://doi.org/10.21008/j.2449-920x.2016.68.4.06>

^{1*}М. А. БУЛАХ

^{1*}Каф. «Управление эксплуатационной работой», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днепро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 70, эл. почта bulah_marina@ukr.net, ORCID 0000-0003-4264-2303

УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ НА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ

Цель. С учётом того, что существующая в Украине методика оценки уровня безопасности движения поездов не обеспечивает получения реальной и адекватной картины, а зарубежный опыт не открывает возможностей аналогичного решения проблем на украинских железных дорогах, целью работы является усовершенствование методики оценки состояния безопасности движения поездов на железной дороге.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Методика. Для удосконалення методики оцінки стану безпеки руху поїздів на залізничній дорозі при проведенні технічного аудиту пропонується використовувати чотири показателя: кількість транспортних происшествий, на які нараховані збитки; кількість нещасних випадків; кількість транспортних происшествий, які відбулися впродовж року, але їх наслідки не пов'язані з фінансовими збитками; кількість порушень, виявлених ревизорами з безпеки руху.

Результати. Виконано удосконалення методики оцінки стану безпеки руху поїздів на залізничній дорозі. При цьому для розрахунку рівня безпеки руху поїздів введено чотири показателя з їх послідовним ранжуванням. На основі статистичних даних за прийнятими показателями була отримана математична модель інтегральної оцінки безпеки руху поїздів, з допомогою якої виконано порівняльну оцінку безпеки руху поїздів в АО «Укрзалізниця». В результаті слід зауважити, що динаміка стану безпеки руху поїздів в 2015–2018 рр. має іншу картину порівняно з звичайним рівнем транспортних происшествий в АО «Укрзалізниця». Удосконалена методика оцінки стану безпеки руху поїздів на залізничній дорозі дозволяє виконати адекватні розрахунки і встановити реальний стан безпеки руху поїздів при проведенні технічного аудиту.

Научна новизна. Вказана методика оцінки стану безпеки руху поїздів на залізничній дорозі, яка може бути застосована при проведенні технічного аудиту.

Практична значимість. Удосконалена методика дозволяє виконувати оцінку загального рівня безпеки руху поїздів і встановлювати в процесі технічного аудиту реальні загрози і ризики, які в подальшому можуть бути усунуті шляхом розробки відповідних заходів і дій.

Ключові слова: залізничний транспорт; безпека руху поїздів; технічний аудит; процеси перевезень; комплексний показник

M. O. BULAKH^{1*}

^{1*}Dep. «Management of Operational Work», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. +38 (056) 373 15 70, e-mail bulah_marina@ukr.net, ORCID 0000-0003-4264-2303

IMPROVING THE METHODOLOGY FOR ASSESSING THE TRAIN TRAFFIC SAFETY AT THE RAILWAY

Purpose. Despite the fact that the current methodology in Ukraine for assessing the train traffic safety at the railway does not provide a real and adequate picture, and foreign experience does not open up the possibility of a similar solution to the problems at Ukrainian railways, the goal has been set to improve the methodology for assessing the train traffic safety at the railway. **Methodology.** To improve the methodology for assessing the train traffic safety at the railway during a technical audit, the use of four indicators is proposed: the number of accidents for which losses are accrued; number of casualties; the number of traffic accidents that occurred during the year, but their consequences are not related to financial losses; number of violations identified by traffic safety auditors.

Findings. The author has improved the methodology for assessing the train traffic safety at the railway. At the same time, four indicators were introduced in the methodology to calculate the train traffic safety at the railway. The ranking of these indicators was also performed. Using statistical data on the adopted indicators, a mathematical model was obtained for the integral assessment of train safety, on the basis of which a comparative assessment of traffic safety was performed at Ukrzaliznytsia JSC. As a result, it should be noted that the dynamics of the state of traffic safety in 2015-2018 has a different picture compared to the usual number of traffic accidents in Ukrzaliznytsia JSC. An improved methodology for assessing the state of train traffic safety at the railway allows us to perform adequate calculations and establish the real state of traffic safety during a technical audit. **Originality.** The author has improved the methodology for assessing the train traffic safety at the railway, which can be applied during the technical audit. **Practical value.** The improved methodology makes it possible to assess the general level of train traffic safety and establish real threats and risks in the process of technical audit, which, in the future, can be eliminated when developing appropriate measures and actions.

Keywords: railway transport; traffic safety; technical audit; transportation processes; integrated indicator

REFERENCES

1. Bolzhelarskyi, Ya. V. (2019). Problematic issues of the international freight rail transportation traffic safety. *Transport systems and transportation technologies*, 18, 5-15. DOI: <https://doi.org/10.15802/tsst2019/182576> (in Ukrainian)
2. Voznyak, O. M., & Ghavryljuk, V. I. (2019). *Zabezpechennja bezpeky rukhu na zaliznychnykh perejizdakh: monografija*. Dnipro: DNUZT. (in Ukrainian)
3. Voznyak, O. M. (2015). Ocinka stanu bezpeky rukhu na zaliznychnykh perejizdakh. *Electromagnetic compatibility and safety on railway transport*, 10, 69-76. DOI: <https://doi.org/10.15802/ecsrt2015/73859> (in Ukrainian)
4. Kuzishin, A. Ya., & Batig, A. V. (2018). The analysis of existing approaches to calculating traffic safety criteria in the railway sector. *Innovative technologies and scientific solutions for industries*, 4(6), 50-56. DOI: <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2018.6.050> (in Ukrainian)
5. Luzhycykj, O. F. (2016). Zabezpechennja bezpeky rukhu na zaliznychnykh perejizdakh. *Ukrajinsjka zaliznycja*, 7(37), 52-56. (in Ukrainian)
6. Okorokov, A. M., & Bulakh, M. O. (2019). Integral assessment of the state of railway train safety during technical audit. *Science and Transport Progress*, 5(83), 99-107. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2019/184389> (in Ukrainian)
7. Okorokov, A. M., & Bulakh, M. O. (2017). Expansion of objectives of the practical application of technical audit at railway transport enterprises. *Science and Transport Progress*, 6(72), 30-39. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2017/117551> (in Ukrainian)
8. Andrić, J. M., Wang, J., & Zhong, R. (2019). Identifying the Critical Risks in Railway Projects Based on Fuzzy and Sensitivity Analysis: A Case Study of Belt and Road Projects. *Sustainability*, 11(5), 1-18. DOI: <https://doi.org/10.3390/su11051302> (in English)
9. Bodnar, B., Bolzhelarskyi, Ya., Ochkasov, O., Hryshechkina, T., & Černiauskaitė L. (2018 April). Determination of Integrated Indicator for Analysis of the Traffic Safety Condition for Traction Rolling Stock. *Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2018)* (pp. 45-54). Panevėžys. (in English)
10. Jamshidi, A., Faghih-Roohi, S., Hajizadeh, S., Núñez, A., Babuska, R., Dollevoet, R., ... & De Schutter, B. (2017). A Big Data Analysis Approach for Rail Failure Risk Assessment. *Risk Analysis*, 37(8), 1495-1507. DOI: <https://doi.org/10.1111/risa.12836> (in English)
11. Leitner, B. (2017). A general model for railway systems risk assessment with the use of railway accident scenarios analysis. *Procedia engineering*, 187, 150-159. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.04.361> (in English)
12. Licciardello, R., Baldassarra, A., Vitali, P., Tieri, A., Cruciani, M., & Vasile, A. N. (2013). Limits and opportunities of risk analysis application in railway systems. *Safety and Security Engineering V*, 134, 133-144. DOI: <https://doi.org/10.2495/safe130131> (in English)
13. Okorokov, A. M., & Bulakh, M. O. (2018). Proposals for improving the process of forming programs of reforming the railway transport industry. *Science and Transport Progress*, 2(74), 57-66. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/130463> (in English)
14. Otto, A., Kellermann, P., Thieken, A., Mániz Costa, M., Carmona, M., & Bubeck, P. (2019). Risk reduction partnerships in railway transport infrastructure in an alpine environment. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 33, 385-397. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2018.10.025> (in English)
15. Sasidharan, M., Burrow, M., Ghataora, G., & Eskandari, T. (2017). A Review of Risk Management Applications for Railways. *14th International Conference of Railway Engineering-2017*, 1-11. DOI: <https://doi.org/10.25084/raileng.2017.0065> (in English)
16. Smoczyński, P., & Kadziński, A. (2016). Introduction to the risk management in the maintenance of railway tracks. *Journal of mechanical and transport engineering*, 68(4), 65-80. DOI: <https://doi.org/10.21008/j.2449-920x.2016.68.4.06> (in English)

Надійшла до редколегії: 28.01.2020

Прийнята до друку: 03.06.2020

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК 629.454.22

С. В. ВОЙТКІВ^{1*}

^{1*}ТзОВ «Науково-технічний центр «Автополіпром», вул. Зубрівська, 32/24, Львів, Україна, 79066, тел. +38 (067) 447 04 90, ел. пошта voytkivsv@ukr.net, ORCID – 0000-0002-7789-2081

АНАЛІЗ КОМПОНУВАЛЬНИХ СХЕМ СПАЛЬНИХ ВАГОНІВ

Мета. У роботі передбачено розроблення, аналіз і вибір компоновальних схем пасажирських вагонів за кількістю та розміщенням тамбурів і санітарних приміщень загального користування для створення перспективних конкурентоспроможних спальних купейних вагонів суттєво вищих рівнів комфортабельності й оцінку перспективності освоєння їх серійного виробництва з умови забезпечення максимальної вмістимості. **Методика.** Аналіз компоновальних схем та планувань наявних спальних купейних вагонів різних європейських виробників і компоновальних схем для створення перспективних вагонів цього типу за розмірними параметрами, кількістю й розміщенням тамбурів і санітарних приміщень загального користування проведено за визначеними критеріями й показниками ефективності запропонованих конструктивних рішень та комфортабельності вагонів. **Результати.** Розроблено компоновальні схеми для проєктування перспективних конкурентоспроможних спальних купейних вагонів, обладнаних двома або одним тамбуром і трьома-чотирма санітарними приміщеннями загального користування – туалетами, туалетами, суміщеними з душовими стояками або душовими кабінами, та окремими душовими кабінами. Запропоновано методику оцінки ефективності пропонувананих конструктивних рішень та комфортабельності перспективних спальних купейних вагонів за кількістю, призначенням і розміщенням санітарних приміщень різного призначення та зручністю користування ними пасажирями. На основі проведеного аналізу запропонованих компоновальних схем вибрано їх оптимальні варіанти, рекомендовані для створення перспективних конкурентоспроможних спальних купейних вагонів суттєво вищого рівня комфортабельності. **Наукова новизна.** Уперше проведено аналіз наявних та нових компоновальних схем пасажирських спальних купейних вагонів за кількістю й розміщенням тамбурів і за кількістю, типами й розміщенням санітарних приміщень загального користування на основі розробленої методики об'єктивної оцінки ефективності запропонованих компоновальних рішень, рівнів комфортабельності вагонів та зручності користування ними пасажирями. **Практична значимість.** Проведений аналіз дає можливість обгрунтованого вибору вже на стадії розроблення ескізних пропозицій оптимальних компоновальних схем для створення перспективних конкурентоспроможних спальних купейних вагонів різних класів підвищеної комфортабельності порівняно з вагонами-аналогами.

Ключові слова: спальний вагон; компоновальна схема; критерії комфортабельності вагонів; конкурентоспроможність спальних вагонів

Вступ

Залізничний транспорт України, на долю якого припадає майже половина річного обсягу пасажирських перевезень усіма видами громадського транспорту, нині перебуває в доволі плачевному стані. Адже з 4 310 одиниць інвентарного парку пасажирських вагонів різних типів – купейних, плацкартних, загальних тощо, станом на 1 січня 2019 року придатними для перевезень пасажирів було лише 3 110 одиниць [5]. Отже, більше ніж четверта частина вагонів не могла бути задіяна для перевезень пасажирів. А говорити про рівень їх комфортабельності взагалі не доводиться, адже відсоток зносу парку пасажирських вагонів із показника у 86

% у 2016 році сягнув рівня 92,6 % у 2019 році. Немає ніяких сумнівів у тому, що парк пасажирських вагонів потребує негайного та якісного оновлення. Але заміна зношених вагонів усіх типів повинна базуватися на сьогоденних і постійно зростаючих вимогах до рівня комфортабельності перевезень пасажирів, пов'язаного, в першу чергу з комфортабельністю вагонів та зручністю користування ними.

Значну частину загального обсягу пасажирських перевезень залізничним транспортом виконують потяги, які обслуговують міжрегіональні маршрути, характерні великими відстанями та часом перебування в дорозі понад вісім годин. Такі потяги комплектують спальними купейними вагонами 1 й 2-го класів та плацка-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ртними вагонами і дуже рідко спальними вагонами класу СВ. Отже, створення та освоєння виробництва нових купейних спальних вагонів суттєво вищого рівня комфортабельності порівняно з тими, які серійно виготовляє ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод», є важливим і вкрай актуальним завданням вітчизняного вагонобудування та інших галузей промисловості. Однією з визначальних умов вирішення цього завдання є збереження або незначне підвищення вартості проїзду в перспективних купейних спальних вагонах за тотожної пасажиромістимості.

Мета

У роботі передбачено розроблення та аналіз компоновальних схем пасажирських вагонів за кількістю й розміщенням тамбурів і кількістю, призначенням і розміщенням санітарних приміщень загального користування, вибір оптимальних схем для створення перспективних конкурентоспроможних спальних купейних вагонів різних рівнів комфортабельності й оцінку перспективності освоєння їх серійного виробництва з умови забезпечення максимальної містимості.

Методика

Аналіз компоновальних схем та планування нових спальних купейних вагонів різних європейських виробників і компоновальних схем перспективних вагонів цього типу проведено на основі розмірних параметрів їх кузовів і пасажирських приміщень, технічних параметрів службових приміщень провідників, розмірних параметрів, кількості й розміщення тамбурів та санітарних приміщень загального користування з урахуванням їх призначення.

Нові компоновальні схеми перспективних спальних вагонів розроблено відповідно до прийнятої концепції, яка передбачає:

- збільшення ширини кузовів вагонів до допустимої за габаритами 1–Т або 1–ВМ;
- застосування не тільки двох тамбурів, а й одного тамбура, розміщеного в одному з кінців вагонів або у середній частині їх кузовів;
- обладнання вагонів більшою кількістю санітарних приміщень загального користування різного призначення – туалетами, туалетами,

суміщеними з душовим стояком або душовою кабіною, окремими душовими кабінами.

Для об'єктивної оцінки ефективності конструктивних рішень та комфортабельності вагонів за відповідними критеріями вибрано характерні показники та запропоновано математичні вирази для їх обчислення.

Більшість сучасних магістральних пасажирських спальних купейних вагонів локомотивної тяги спроектовані за стандартною компоновальною схемою, яка передбачає два тамбури та два туалетні приміщення загального користування, розміщені в обох кінцях їх кузовів. Крім того, спальні вагони, за вимогами нормативних документів, повинні бути обладнані службовим і технічним приміщеннями та купе відпочинку провідників. Проте рівні комфортабельності навіть таких спальних вагонів одного класу можуть суттєво різнитися, адже їх пасажирські та службові приміщення можуть мати різні розмірні параметри.

Проблеми підвищення комфортабельності сучасних і перспективних пасажирських вагонів розглядають у багатьох дослідженнях. Загальний аналіз світових тенденцій розвитку пасажирського вагонобудування, наведений у роботі [15], визначає підвищення комфортабельності вагонів упровадженням нових систем опалення, вентиляції та кондиціонування повітря, інформаційних табло, застосуванням нових матеріалів, вакуумних туалетів тощо. Типаж пасажирських вагонів, запропонований у роботі [3], передбачає підвищення комфортабельності перевезень пасажирів застосуванням купе різної містимості та комплектацій. Напрямки зменшення рівнів внутрішнього шуму в пасажирських вагонах та зовнішнього шуму, створюваного ними під час руху, розглянуті в роботі [22]. Можливості зниження рівнів внутрішнього шуму шляхом використання нетрадиційного дизайну та відповідних матеріалів показані в роботі [18]. У роботах [7, 16, 17, 19] досліджений рівень температур у пасажирських приміщеннях вагонів залежно від параметрів систем природної вентиляції й систем кондиціонування повітря та від температури повітря зовнішнього середовища. Окреслені шляхи забезпечення у вагонах діапазону температур, комфортабельних для пасажирів. Вплив на комфортабельність перевезень пасажирів залізни-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

чним транспортом таких параметрів, як вентиляція та температура повітря у вагонах, рівень освітленості в купе і пасажирських, службових та санітарних приміщеннях, фотостимуляція, перепади тиску, тривалість подорожі тощо розглянуто в роботі [20].

Необхідність підвищення рівнів комфортності пасажирських спальних вагонів з огляду на поліпшення умов праці провідників обґрунтована роботами [1, 6, 8, 12, 13].

Аналіз конструкцій сучасних пасажирських спальних купейних вагонів 1 та 2-го класів показує, що за кількістю тамбурів і розміщенням туалетних приміщень загального користування

вони спроектовані за трьома основними компоновальними схемами:

– із двома тамбурами й двома туалетними приміщеннями, розміщеними біля робочого й неробочого тамбурів, тобто у двох кінцях кузова вагона (рис. 1, *а*);

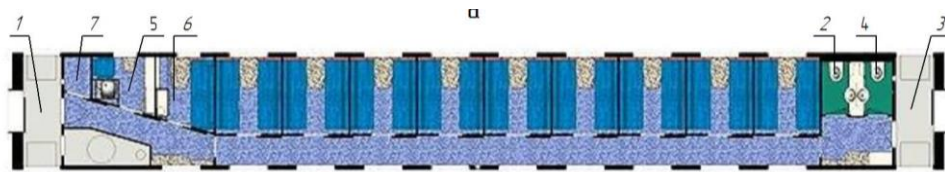
– із двома тамбурами й двома туалетними приміщеннями, розміщеними суміжно біля неробочого тамбура, тобто в одному кінці кузова вагона (рис. 1, *б*);

– з одним тамбуром, розміщеним в одному з кінців кузова вагона, і двома туалетними приміщеннями, розміщеними суміжно в протилежному кінці кузова вагона (рис. 1, *в*).

а – а



б – б



в – в

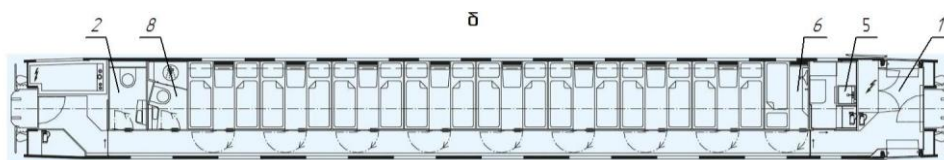


Рис. 1. Основні компоновальні схеми пасажирських спальних купейних вагонів за кількістю та розміщенням тамбурів і санітарних приміщень:

- а* – моделі 61–779 [11] із двома тамбурами й двома рознесеними туалетними приміщеннями;
б – моделі 61–4447 [9] із двома тамбурами й двома суміжними туалетними приміщеннями;
в – фірми «Stadler rail AG» [21] з одним тамбуром і двома суміжними санітарними приміщеннями;
 1 – робочий тамбур; 2 і 4 – туалетні приміщення; 3 – неробочий тамбур;
 5 – службове приміщення провідників; 6 – купе відпочинку провідників;
 7 – допоміжне приміщення; 8 – санітарне приміщення: вакуумний туалет із душовою кабінною

Fig. 1. The main layout of passenger sleeping compartment cars by the number and location of enclosed platforms and sanitary facilities:

- a* – models 61–779 [11] with two enclosed platforms and two spaced sanitary facilities;
b – models 61–4447 [9] with two enclosed platforms and two adjacent sanitary facilities;
c – Stadler rail AG [21] with one enclosed platform and two adjacent sanitary facilities;
 1 – working enclosed platform; 2 and 4 – lavatory rooms; 3 – non-working enclosed platform;
 5 – service room of conductors; 6 – rest compartment of conductors;
 7 – auxiliary room; 8 – bathroom: vacuum toilet with shower

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Аналіз основних технічних вимог до тамбурів, службових приміщень провідників та санітарних приміщень загального користування пасажирських спальних вагонів, наведених у табл. 1, показує, що для розроблення нових

Таблиця 1

Основні вимоги до спальних вагонів

Table 1

Basic requirements for sleeping cars

Найменування параметра	ДСТУ 4049 [4]	СП 2.5.1198 [14]
Розмірні параметри тамбурів – ширина/ довжина, м, не менше:	1,0/ 2,7	
Ширина дверей, м, не менше:		
– вхідних бокових	0,78	
– вхідних торцевих	0,7	
– внутрішніх проходів	0,7	0,68
Ширина проходу по пасажирському приміщенню, м, не менше:	0,75	0,68
Вимоги до туалетного приміщення:		
– кількість, од., не менше	–	2
– площа, м ² , не менше	–	1,2
– ширина, м, не менше	–	0,9
– ширина дверей, м, не менше	–	0,49
Площа службового приміщення провідників, м ² , не менше	2,6	

компонувальних схем можуть бути взяті такі вихідні параметри, не менше: ширина тамбурів – 1,0 м, ширина внутрішніх дверей – 0,7 м, ширина поздовжніх проходів по пасажирських приміщеннях – 0,75 м, площа туалетного приміщення – 1,2 м², службового приміщення провідників – 2,6 м².

Розроблення компоувальних схем перспективних купейних спальних вагонів підвищеної комфортабельності базується на таких варіантах кількості та розміщення тамбурів:

- із двома тамбурами – одним робочим та одним запасним, розміщеними в кінцях вагона;
- з одним робочим тамбуром, розміщеним в одному з кінців кузова вагона;
- з одним робочим тамбуром, розміщеним у середній частині кузова вагона.

Можливість застосування лише одного робочого тамбура (без запасного) ґрунтується на наявних вагонах з одним тамбуром (рис. 1, в) та на рекомендаціях документа [10].

Крім того, однією з умов розроблення нових компоувальних схем перспективних спальних купейних вагонів підвищеної комфортабельності є застосування трьох або й більше санітарних приміщень, у т. ч. туалетних приміщень, обладнаних душовими стояками або суміщених із душовими кабінами, та окремих душових кабін.

За основу для розроблення компоувальних схем перспективних спальних купейних вагонів підвищеної комфортабельності взято габаритні розміри кузова, аналогічні кузовам вагонів швидкісних потягів локомотивної тяги постійного формування виробництва ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод», довжиною 26,1 і шириною 3,4 м.

У загальному випадку кузови пасажирських спальних купейних вагонів складаються з трьох основних (базових) модулів (рис. 2):

– модуля службових приміщень провідників, до складу якого входять робочий тамбур, туалетне приміщення загального користування, службове купе, купе відпочинку провідників, технічний блок та коридор;

– модуля пасажирського приміщення, у якому розміщуються пасажирські купе, а також коридор (поздовжній прохід по пасажирському приміщенню);

– модуля санітарних приміщень загального користування, до якого входить коридор, туалетне приміщення та неробочий тамбур.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

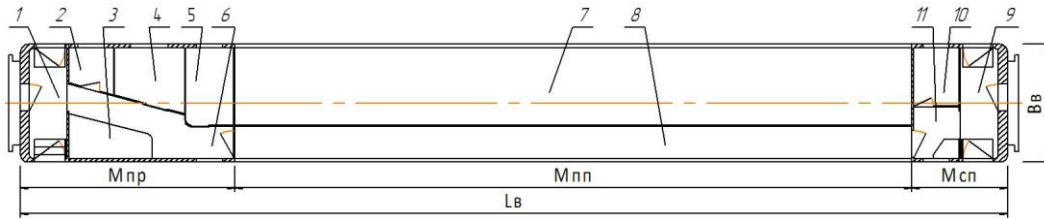


Рис. 2. Основні модулі пасажирських спальних купейних вагонів:

M_{np} – модуль службових приміщень провідників; M_{nn} – модуль пасажирського приміщення;

M_{cn} – модуль санітарних приміщень загального користування;

1 – робочий тамбур; 2 і 10 – туалетні приміщення; 3 – технічний блок; 4 – службове приміщення провідників;
5 – купе відпочинку провідників; 6, 8 та 11 – коридори; 7 – зона розміщення пасажирських купе

Fig. 2. The main modules of passenger sleeping compartment cars:

M_{np} – service room module of conductors; M_{nn} – passenger compartment module;

M_{cn} – module of public sanitary facilities;

1 – working enclosed platform; 2 and 10 – lavatory rooms; 3 – technical room; 4 – service room of conductors;
5 – rest compartment of conductors; 6, 8 and 11 – corridors; 7 – passenger compartment area

Варіант компоувальної схеми sV–200 для створення перспективних спальних купейних вагонів підвищеної комфортабельності з двома тамбурами наведений на рис. 3. Модуль службових приміщень провідників (M_{np}) вагона об-

ладнений одним туалетним приміщенням із пеленальним столиком, а модуль санітарних приміщень (M_{cn}) – одним туалетним приміщенням із суміщеною душовою кабіною. Фактично це схема з двома санітарними приміщеннями.

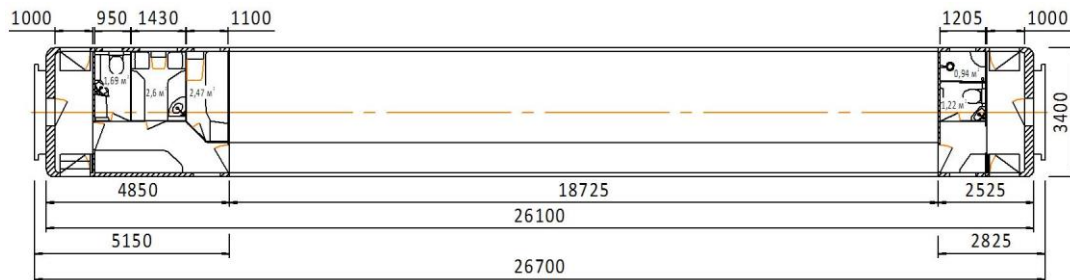


Рис. 3. Компоувальна схема sV–200 двотамбурного вагона з одним туалетним приміщенням із пеленальним столиком та одним туалетним приміщенням із суміщеною душовою кабіною

Fig. 3. Layout scheme of sV–200 car with two enclosed platforms and one lavatory room with changing table and one lavatory room with combined shower cabin

Ширина санітарного приміщення модуля службових приміщень загального користування взято рівною 1,205 м з умови рекомендованої мінімальної площі туалетних приміщень, рівної 1,2 м², та рекомендованої відстані від торця унітаза до перегородки або входних дверей у межах 0,53–0,6 м.

Для проектування перспективних спальних купейних вагонів, обладнаних двома тамбурами, із більшим рівнем комфортабельності пропонується компоувальна схема sV–201 з додатковим санітарним приміщенням – душовою кабіною з умивальником та пеленальним столиком (рис. 4). Приміщення душової кабіни за

розмірними параметрами уніфіковане з туалетним приміщенням модуля M_{np} .

Інший варіант компоувальної схеми для створення перспективних спальних купейних вагонів sV–202 наведений на рис. 5. Він передбачає обладнання вагона двома туалетними приміщеннями з пеленальними столиками, розміщеними в модулях M_{np} та M_{cn} , та двома душовими кабінами, встановленими перед запасним тамбуром. Вхід до однієї з душових кабін передбачений із неробочого тамбура. Одна з переваг цього варіанта компоувальної схеми – менша на 0,325 м довжина модуля санітарних приміщень порівняно зі схемою sV–201 (рис. 4)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

і, відповідно, більша довжина пасажирського приміщення. Хоча порівняно зі схемою sV–200, наведеною на рис. 3, довжина пасажирських

приміщень вагонів за схемами sV–201 (рис. 4) і sV–202 (рис. 5) загалом менша відповідно на 0,645 м та 0,95 м.

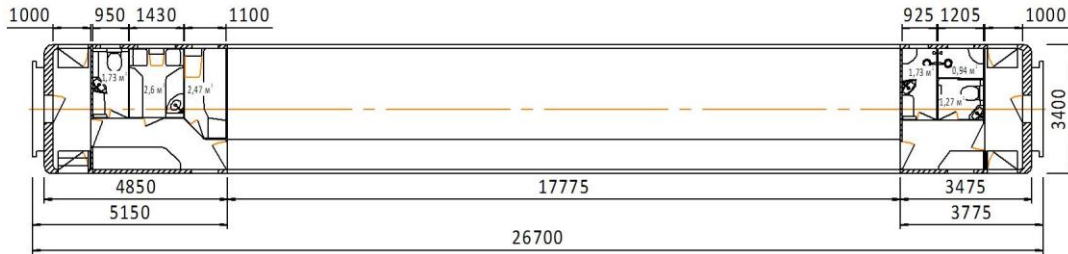


Рис. 4. Компонувальна схема sV–201 двотамбурного вагона з двома туалетними приміщеннями з пеленальними столиками й одним туалетним приміщенням із суміщеною душовою кабінною

Fig. 4. Layout scheme of sV–200 car with two enclosed platforms and one lavatory room with changing table and one lavatory room with combined shower cabin

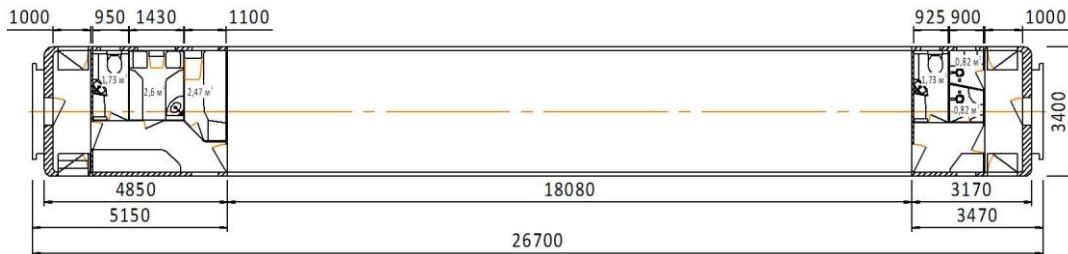


Рис. 5. Компонувальна схема sV–202 двотамбурного вагона з двома туалетними приміщеннями з пеленальними столиками та двома душовими кабіннами

Fig. 5. Layout scheme of sV–202 car with two enclosed platforms and two lavatory rooms with changing tables and two shower cabins

Збільшення довжини пасажирського приміщення відносно схеми sV–200 на 0,24 м забезпечує компонувальна схема sV–100 спальних

купейних вагонів, обладнаних лише одним тамбуром та одним запасним виходом, яка наведена на рис. 6.

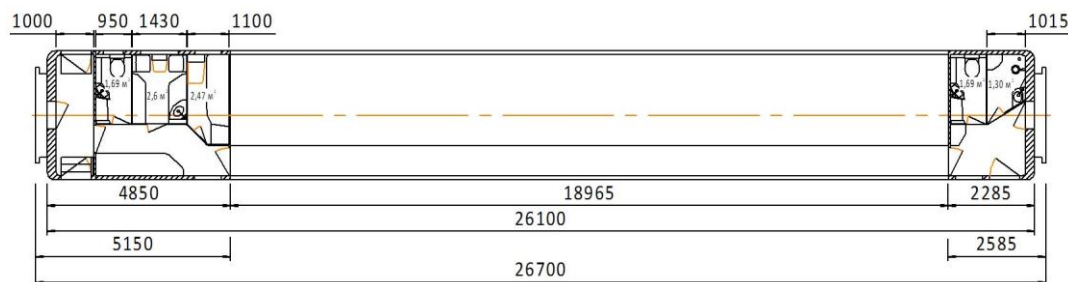


Рис. 6. Компонувальна схема sV–100 одготамбурного вагона з двома туалетними приміщеннями з пеленальними столиками та однією душовою кабінною

Fig. 6. Layout scheme of sV–100 with one enclosed platform and two lavatory rooms with changing tables and one shower cabin

Ще більшу довжину пасажирського приміщення спальних купейних вагонів забезпечує застосування компонувальних схем з одним тамбуром без запасного виходу в модулях сані-

тарних приміщень. Довжина пасажирського приміщення вагона, створеного за схемою sV–101 (рис. 7), становить 19,125 м.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

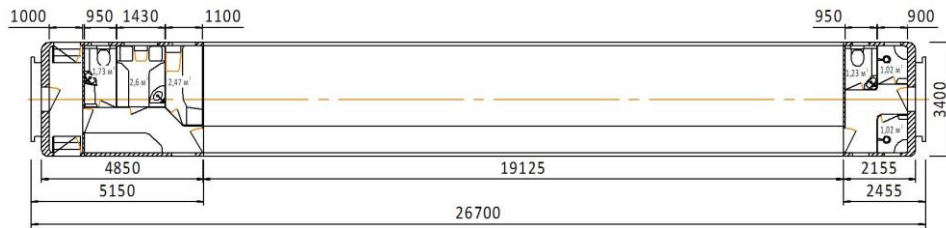


Рис. 7. Компонувальна схема sV–101 однетамбурного вагона з одним туалетним приміщенням із пеленальним столиком, одним туалетним приміщенням і двома душовими кабінами

Fig. 7. Layout scheme of sV–101 with one enclosed platform and one lavatory room with changing table, one lavatory room and two shower cabins

Крім туалетного приміщення з пеленальним столиком у модулі службових приміщень провідників, схема передбачає розміщення в модулі санітарних приміщень ще одного туалетного приміщення та двох душових кабін. Ця схема є найкращою за кількістю санітарних приміщень.

На основі компоувальної схеми sV–101 зроблена схема sV–110 без туалетного приміщення в модулі службових приміщень провідників ($M_{\text{пр}}$). Довжина пасажирського приміщення вагона за цією схемою (рис. 8) складає 19,325 м.

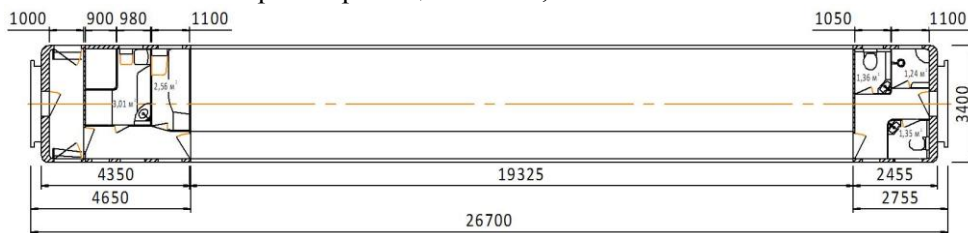


Рис. 8. Компонувальна схема sV–110 однетамбурного вагона з одним туалетним приміщенням і двома душовими кабінами, розміщеними в модулі санітарних приміщень

Fig. 8. Layout scheme of sV–110 car with one enclosed platform and one lavatory room and two shower cabins located in the sanitary facilities module

Наступні компоувальні схеми для створення перспективних спальних купейних вагонів лише з одним тамбуром передбачають його розміщення в середній частині їх кузовів. Завдяки цьому одне пасажирське приміщення розділене на дві частини, у яких можуть перебувати 20 або 40 чол. залежно від 1 або 2-го класів вагонів.

Вагон, спроектований за компоувальною схемою, наведеною на рис. 9, зі зміщеними вхі-

дними дверима, обладнаний двома туалетними приміщеннями, розміщеними в обох його кінцях, та душовою кабіною, яка входить до складу модуля службових приміщень провідників. Вона розміщена окремо в тамбурній зоні.

Безумовно, пропонується компоувальна схема sV–120 сприяє зменшенню рівнів шуму в обох частинах пасажирського приміщення й суттєво підвищує рівень комфортабельності вагонів.

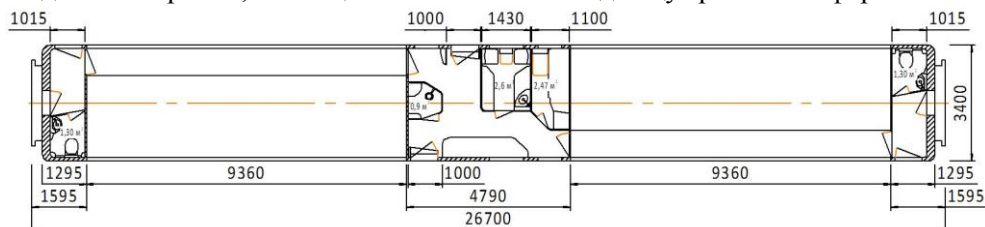


Рис. 9. Компонувальна схема sV–120 однетамбурного вагона з двома туалетними приміщеннями й однією душовою кабіною, розміщеною в модулі службових приміщень провідників

Fig. 9. Layout scheme sV–120 car with one enclosed platform and two lavatory rooms and one shower cabin, located in the module of service room of conductors

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Варіант компоувальної схеми sV–130 для створення перспективних спальних купейних вагонів підвищеної комфортабельності з модулем службових приміщень провідників $M_{\text{пр}}$, розмішеним у середній частині їх кузовів, передбачає застосування тамбура з протилежними

вхідними дверима. Два туалетних приміщення теж знаходяться в обох кінцях кузовів вагонів, а душова кабіна зблокована з купе відпочинку провідників та технічним приміщенням, що забезпечує більшу довжину обох частин пасажирських приміщень (рис. 10).

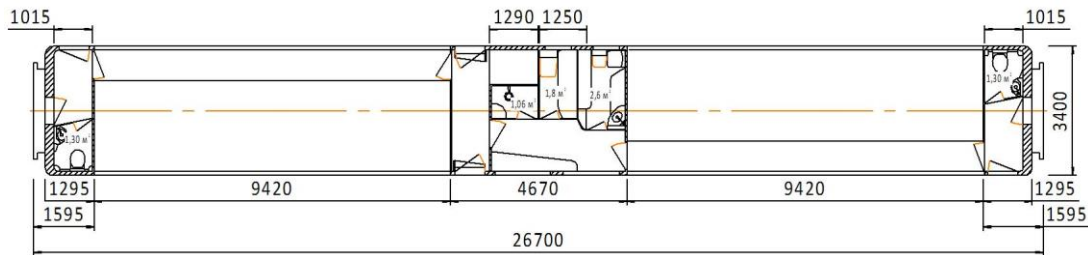


Рис. 10. Компоувальна схема sV–130 однотоамбурного вагона з двома туалетними приміщеннями й однією душовою кабіною, розміщеною в модулі службових приміщень провідників

Fig. 10. Layout scheme of sV–130 car with one enclosed platform and two lavatory rooms and one shower cabin located in the module of service rooms of conductors

Аналогічна за кількістю й функціональним призначенням санітарних приміщень компоувальна схема sV–140, наведена на рис. 11, характерна діагонально розташованими вхідними

тамбурними дверима. Таке конструктивне рішення забезпечило збільшення довжини кожної з обох частин пасажирського приміщення вагона до 9,47 м та площ службових приміщень.

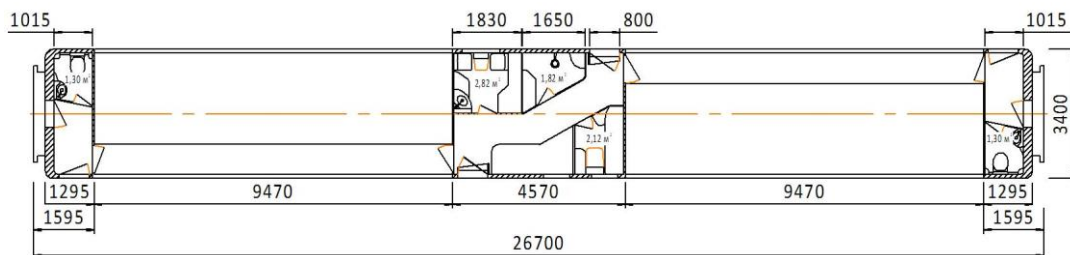


Рис. 11. Компоувальна схема sV–140 однотоамбурного вагона з двома туалетними приміщеннями й двома душовими кабінами, розмішеними в модулі службових приміщень провідників

Fig. 11. Layout scheme sV–140 car with one enclosed platform and two lavatory rooms and two shower cabins located in the module of service rooms of conductors

Для створення перспективних спальних купейних вагонів 1 й 2-класів, обладнаних двома туалетними приміщеннями у кінцях їх кузовів та двома душовими кабінами, розмішеними в тамбурній зоні модуля службових приміщень провідників, пропонуємо компоувальну схему sV–150, наведену на рис. 12. З огляду на кількість санітарних приміщень ця схема забезпе-

чує найвищий рівень комфортабельності. Адже навіть за довжини кожної частини пасажирського приміщення у 9,2 м у них забезпечується розміщення п'ятьох купе шириною 1,82 м, що на 0,046 м більше ніж у сучасних спальних купейних вагонів моделей 61–779 та 61–779А виробництва ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод» (1,774 м) [11].

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

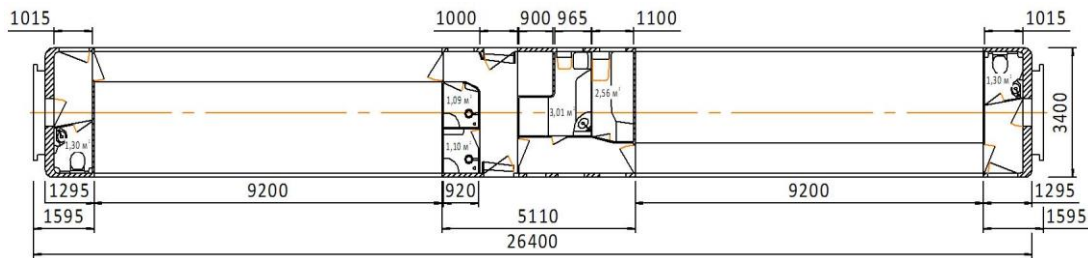


Рис. 12. Компонувальна схема sV–150 однетамбурного вагона з двома туалетними приміщеннями й двома душовими кабінами, розміщеними в модулі службових приміщень провідників

Fig. 12. Layout scheme of sV–150 car with one enclosed platform and two lavatory rooms and two shower cabins located in the module of service rooms of conductors

Для проведення аналізу та вибору оптимальних компонувальних схем, рекомендованих для проєктування перспективних конкурентоспроможних купейних спальних вагонів 1 та 2-го класів, пропонуємо узагальнений коефіцієнт ефективності їх планування та зручності користування ними:

$$k_{\text{ефп}} = k_{\text{пл}} + (k_{\text{сп}}^n + k_{\text{сп}}^s - k_{\text{т}}^s) - (1 - k_{\text{ск}}^s - k_{\text{кв}}^s), \quad (1)$$

де $k_{\text{пл}}$ – коефіцієнт площі вагона, призначеної для розміщення пасажирських купе та коридору; $k_{\text{сп}}^n$ – коефіцієнт кількості санітарних приміщень загального користування; $k_{\text{сп}}^s$ – коефіцієнт комфортабельності санітарних приміщень за площею; $k_{\text{т}}^s$ – коефіцієнт площі тамбурів; $k_{\text{ск}}^s$ – коефіцієнт зручності службового купе провідників; $k_{\text{кв}}^s$ – коефіцієнт комфортабельності купе відпочинку провідників.

Коефіцієнт площі вагона, призначеної для розміщення пасажирських купе та поздовжнього коридору, характеризує ефективність планувальних рішень і визначається за виразом:

$$k_{\text{пл}} = \frac{L_{\text{к}} - (L_{\text{Мпр}} + L_{\text{Мсп}})}{L_{\text{к}}}, \quad (2)$$

де $L_{\text{к}}$ – довжина кузова вагона, м; $L_{\text{Мпр}}$ – довжина модуля службових приміщень провідників, м; $L_{\text{Мсп}}$ – довжина модуля санітарних приміщень загального користування, м.

Коефіцієнт кількості санітарних приміщень загального користування характеризує кількість туалетних приміщень та душових стояків, суміщених або окремих душових кабіні у вагоні:

$$k_{\text{сп}}^n = 0,1(n_{\text{тп}} + k_{\text{ду}} \times n_{\text{ду}}), \quad (3)$$

де $n_{\text{тп}}$ – кількість туалетних приміщень, од.; $k_{\text{ду}}$ – коефіцієнт, який враховує тип душових установок [2]; для душового стояка в туалетному приміщенні $k_{\text{ду}} = 0,5$; для душової кабіни, суміщеної з туалетним приміщенням, $k_{\text{ду}} = 0,75$; для окремої душової кабіни $k_{\text{ду}} = 1,0$; $n_{\text{ду}}$ – кількість душових установок, од.

Коефіцієнт комфортабельності санітарних приміщень за площею визначається за виразом:

$$k_{\text{сп}}^s = \frac{1}{0,1S_{\text{к}}} \times \sum_{i=1}^n S_{\text{сп}i}, \quad (4)$$

де $S_{\text{к}}$ – площа кузова вагона, м²; $S_{\text{сп}i}$ – площа окремого i -го санітарного приміщення, м²; $n_{\text{сп}}$ – кількість санітарних приміщень загального користування, од.

Коефіцієнт площі тамбурів характеризує загальну площу тамбурів у вагоні:

$$k_{\text{сп}}^s = \frac{1}{0,1S_{\text{к}}} \times \sum_{i=1}^n S_{\text{т}i}, \quad (5)$$

де $S_{\text{т}i}$ – площа окремого i -го тамбура, м²; $n_{\text{т}}$ – кількість тамбурів у вагоні, од.

Коефіцієнт зручності службового купе провідників характеризується його площею і визначається за формулою:

$$k_{\text{т}}^s = \frac{S_{\text{ск}}}{0,1S_{\text{к}}}, \quad (6)$$

де $S_{\text{ск}}$ – площа службового купе провідників, м².

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Коефіцієнт комфортабельності купе для відпочинку провідників характеризується розмірними параметрами та його площею:

$$k_{\text{кв}}^s = \frac{S_{\text{кв}}}{0,1S_{\text{к}}}, \quad (7)$$

де $S_{\text{кв}}$ – площа купе для відпочинку провідників, м².

Результати розрахунків з оцінки пропонованих компоновальних схем для створення перспективних конкурентоспроможних спальних купейних вагонів 1 й 2-го класів за коефіцієнтами ефективності планувальних рішень та зручності користування вагонами за виразами (1)–(7) наведено в табл. 2.

Таблиця 2

Оцінка пропонованих компоновальних схем для проєктування перспективних спальних купейних вагонів 1 та 2-го класів

Table 2

Evaluation of the proposed layout schemes for the design of promising sleeping compartment cars of 1st and 2nd classes

Найменування параметра	Позначення компоновальної схеми									
	sV-200	sV-201	sV-202	sV-100	sV-101	sV-110	sV-120	sV-130	sV-140	sV-150
Площа кузова вагона, м ²	88,74									
Довжина модулів, м:										
– службових приміщень провідників (M _{пр})	4,85					4,35	4,79	4,67	4,57	5,11
– санітарних приміщень (M _{сп})	2,53	3,48	3,17	2,29	2,16	2,46	2,59			
– пасажирського приміщення (M _{пн})	18,73	17,78	18,08	18,97	19,13	19,33	18,72	18,84	18,94	18,40
Коефіцієнт $k_{\text{пн}}$	0,717	0,681	0,693	0,726	0,731	0,739	0,717	0,722	0,726	0,705
Кількість санітарних приміщень, од.										
– туалетних приміщень	1	2								
– суміщених душових кабін	1		–			–				
– окремих душових кабін	–		2	1	2	1			2	
Коефіцієнт $k_{\text{сп}}^n$	0,175	0,275	0,40	0,30	0,40	0,30				0,40
Площа санітарних приміщень, м ²	3,85	5,67	5,10	4,68	5,00	3,95	3,50	3,66	4,42	4,79
Коефіцієнт $k_{\text{сп}}^s$	0,434	0,639	0,575	0,527	0,563	0,445	0,394	0,412	0,498	0,54

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Продовження табл. 2
Continuation of Table 2

Найменування параметра	Позначення компоувальної схеми									
	sV-200	sV-201	sV-202	sV-100	sV-101	sV-110	sV-120	sV-130	sV-140	sV-150
Площа тамбурів, м ²	6,39			3,20			5,18	3,20		3,40
Коефіцієнт k_T^s	0,72			0,361			0,584	0,361		0,383
Площа службового купе, м ²	2,6					3,01	2,6		2,82	3,01
Коефіцієнт $k_{СК}^s$	0,293					0,339	0,293		0,318	0,339
Площа купе відпочинку провідників, м ²	2,47					2,56	2,47	1,80	2,12	2,56
Коефіцієнт $k_{КВ}^s$	0,278					0,288	0,278	0,203	0,239	0,288
Коефіцієнт ефективності планування вагона та зручності користування ним, $k_{эфп}$	1,035	1,304	1,377	1,621	1,762	1,496	1,256	1,577	1,606	1,635

Результати

Аналіз отриманих результатів досліджень із визначено оптимальних компоувальних схем для проектування перспективних конкуренто-

спроможних спальних купейних вагонів 1 та 2-го класів за коефіцієнтами ефективності планувальних рішень та зручності користування ними, наведених на діаграмі (рис. 13),

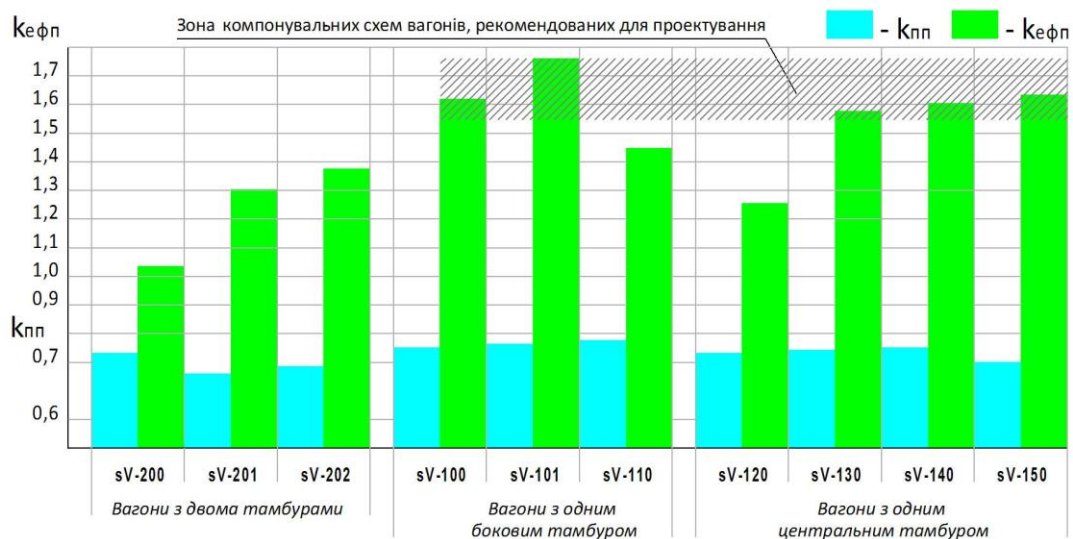


Рис. 13. Аналіз пропонованих компоувальних схем для проектування перспективних конкурентоспроможних купейних спальних вагонів 1 та 2-го класів за ефективністю планувань та зручністю користування

Fig. 13. Evaluation of the proposed layout schemes for the design of promising sleeping compartment cars of 1st and 2nd classes

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

Показує, що:

– за коефіцієнтом площі кузова вагона, призначеної для розміщення пасажирських приміщень – пасажирських купе та коридору, який характеризує ефективність їх планувань, перевага належить компоновальним схемам з одним тамбуром, розміщеним в одному з кінців вагона, – sV–100 (рис. 6), sV–101 (рис. 7) та sV–110 (рис. 8) або з центральним розміщенням тамбура – схема sV–140 (рис. 11), для яких $k_{\text{пл}} = 0,726–0,739$;

– за узагальненим коефіцієнтом ефективності планувань вагонів та зручності користування ними кращими теж є компоновальні схеми з одним тамбуром, розміщеним або в одному з кінців вагона, – схема sV–100 (рис. 6), схема sV–101 (рис. 7) та sV–110 (рис. 8), для яких $k_{\text{ефп}} = 1,496–1,762$, або з центральним розміщенням тамбура – схема sV–130 (рис. 10), схема sV–140 (рис. 11) та схема sV–150 (рис. 12), для яких $k_{\text{ефп}} = 1,577–1,635$;

– за обома коефіцієнтами найкращою є компоновальна схема sV–101, для якої $k_{\text{пл}} = 0,731$ і $k_{\text{ефп}} = 1,762$.

Для порівняння: коефіцієнт площі кузовів сучасних спальних купейних вагонів моделей 61–779 та 61–779А виробництва ПАТ «Крюківський вагонобудівний завод», призначеної для розміщення пасажирських приміщень, дорівнює $k_{\text{пл}} = 0,688$, а узагальнений коефіцієнт ефективності планувань вагонів та зручності користування ними складає $k_{\text{ефп}} = 0,915$.

Наукова новизна та практична значимість

Новим у роботі є те, що вперше проведено аналіз наявних та нових компоновальних схем пасажирських спальних купейних вагонів за кількістю й розміщенням тамбурів і за кількістю, типами й розміщенням санітарних приміщень на основі розробленої методики об'єктивної оцінки ефективності компоновальних рішень, рівнів комфортабельності вагонів та зручності користування ними пасажирами.

Практична значимість роботи полягає в можливості обгрунтованого вибору вже на стадії розроблення ескізних пропозицій оптимальних компоновальних схем для створення перспективних конкурентоспроможних спальних купейних вагонів різних класів за рівнем комфортабельності з умов заданої кількості пасажирів у купе та загальної вмістимості вагонів.

Висновки

Компоновальні схеми спальних купейних вагонів з одним тамбуром sV–100 і sV–101 та sV–130, sV–140 і sV–150 за узагальненим коефіцієнтом ефективності їх планувань та зручності користування ними мають беззаперечну перевагу порівняно зі схемами, які передбачають застосування двох тамбурів, – їх $k_{\text{ефп}}$ більший на 14,5–70,2 %.

Компоновальні схеми спальних купейних вагонів sV–100 та sV–130, sV–140 і sV–150 забезпечують більшу безпечність перевезень пасажирів за рахунок одного (sV–100) або двох запасних виходів (схеми з розміщенням тамбура в середній частині кузовів вагонів).

Компоновальні схеми з одним тамбуром, розміщеним у середній частині кузовів вагонів завдяки поділу пасажирських салонів на дві частини, забезпечують більш комфортабельні умови перевезень пасажирів за рахунок перебування в кожній частині меншої кількості пасажирів.

Для проектування перспективних конкурентоспроможних спальних купейних вагонів підвищеної комфортабельності оптимальними є такі компоновальні схеми:

– sV–140 – для створення спальних купейних вагонів підвищеної комфортабельності 1-го класу з двомісними та 2-го класу з чотиримісними купе вмістимістю відповідно 20 та 40 чол. за ширини купе 1,87 м;

– sV–150 – для створення спальних купейних вагонів підвищеної комфортабельності з одномісними купе вмістимістю 14 чол. за ширини купе 1,29 м.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вильк М. Ф., Юдаева О. С., Аксенов В. А., Пономарев В. М., Апатцев В. И., Сорокина В. А., Простомолотова В. Б., Козлов А. С., Латынин Е. О. Анализ вредных производственных факторов на рабочем месте проводника пассажирского вагона. *Анализ риска здоровью*. 2017. № 4. С. 97–107. DOI: <https://doi.org/10.21668/health.risk/2017.4.11>
2. Войтків С. В. Методика оцінки рівня комфортабельності пасажирських купейних спальних вагонів. *Наука та прогрес транспорту*. 2020. № 1 (85). С. 44–55. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/200751>
3. Донченко А. В., Троцкий М. В., Крупа А. Г., Рейдемейстер Г. В. Типаж перспективных пассажирских вагонов локомотивной тяги для магистральных железных дорог Украины. *Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. 2007. № 14. С. 132–135.
4. ДСТУ 4049-2001. Вагони пасажирські магістральні локомотивної тяги. Вимоги безпеки. [Чинний від 2002-03-01]. Київ : Держстандарт України, 2001. 24 с.
5. Інформація про Українські залізниці. Залізничний транспорт. *Міністерство інфраструктури України* : офіц. веб-сайт. URL: <https://cutt.ly/quLbqWa> (дата звернення: 27.04.2020).
6. Королева А. М., Пономарев В. М., Вильк М. Ф., Юдаева О. С., Филиппов В. Н. Анализ комфортабельности пассажирских вагонов и влияние ее на трудовую деятельность работников железнодорожного комплекса. *XXI век : итоги прошлого и проблемы настоящего плюс*. 2018. Т. 7. № 2 (42). С. 50–53.
7. Лексина А. Г., Минеева Н. И., Моргунов А. В., Тимошенкова Е. В., Грибов А. В., Демин В. Н., Хлебников В. Г., Васкина М. Ю. Прогнозирование теплового комфорта проезда пассажиров в салонах электропоездов. Теория и практика. *Гигиена и санитария*. 2019. Т. 98, № 5. С. 489–493. DOI: <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-5-489-493>.
8. Логинова В. А. Гигиеническая оценка условий труда и профессионального риска здоровью работников на объектах железнодорожного транспорта. *Анализ риска здоровью*. 2017. № 2. С. 96–101. DOI: <https://doi.org/10.21668/health.risk/2017.2.10>
9. ОАО «Тверской вагоностроительный завод». Модельный ряд выпускаемой продукции. Вагоны пассажирские. URL: <http://tvz.ru/catalog/passenger> (дата звернення: 27.04.2020).
10. Основные принципы и критерии технических требований к техническим средствам для использования их на пространстве 1520 : Документ 998_314. Верхов. Рада України. *Законодавство України*. URL: https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/998_314/sp:max25 (дата звернення: 27.04.2020).
11. ПАТ «Крюковский вагоностроительный завод». *Пассажирское вагоностроение. Каталог*. URL: <http://www.kvsz.com/images/catalogs/tsn.pdf> (дата звернення: 27.04.2020).
12. Пономарев В. М., Сачкова О. С., Королева А. М. Анализ и расчеты рисков факторов трудовой деятельности работников железнодорожного комплекса на заболеваемость. *Наука и техника транспорта*. 2018. № 3. С. 108–111.
13. Самарская Н. А., Ильин С. М. Обеспечение безопасных условий труда и защита здоровья работников железнодорожного транспорта. *Экономика труда*. 2018. Т. 5, № 4. С. 1329–1346. DOI: <https://doi.org/10.18334/et.5.4.39519>
14. СП 2.5.1198-03. Санитарные правила по организации пассажирских перевозок на железнодорожном транспорте. [Чинний від 2003-06-03]. Москва : МПС РФ, 1998. 46 с.
15. Федюшин Ю. М., Лобойко Д. М., Донченко А. В., Пшінько О. М., Приходько В. І., Шкабров О. А. Аналіз світових тенденцій і перспектив розвитку пасажирського вагонобудування. *Вісн. Дніпропетр. нац. ун-ту залізн. трансп. ім. акад. В. Лазаряна*. 2005. № 7. С. 25–32.
16. Colino M., Rosenstein E. B. Preserving Passenger Comfort Through RWI Analysis. *ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. 2012. Vol. 11. P. 241–250. DOI: <https://doi.org/10.1115/IMECE2012-85669>
17. Kapalo P., Myroniuk Kh., Domnita F., Bacotiu C. Monitoring of indoor air in a passenger railway wagons. *SCTP*. 2018. Vol. 888. P. 72–78.
18. Leštinský L., Zvolenský P. New methods of noise reduction in railway carriages. *Transportation Research Procedia*. 2019. Vol. 40. P. 778–783. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.110>
19. Moon J. H., Jeong C. H., Lee S. H., Lee J. W. Thermal comfort analysis in a passenger compartment considering the solar radiation effect. *International Journal of Thermal Sciences*. 2016. Vol. 107. P. 77–88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.03.013>
20. Osborne D. J. Passenger comfort – an overview. *Appl Ergonomics*. 1978. Vol. 9. Iss. 3. P. 131–136. DOI: [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(78\)90002-9](https://doi.org/10.1016/0003-6870(78)90002-9)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

21. STADLER. *О каждом поезде : Проекты Stadler*. URL: <https://www.stadlerail.com/ru/ssylki/zagruzki/> (дата звернення: 27.04.2020).
22. Zvolenský P., Grenčík J., Pultznerová A., Kašiar L. Research of noise emission sources in railway transport and effective ways of their reduction. *MATEC Web of Conferences*. 2017. Vol. 107. P. 1–10. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710700073>

С. В. ВОЙТКІВ^{1*}

^{1*}ООО «Научно-технический центр «Автополипром»», ул. Зубриковская, 32/24, Львов, Украина, 79066, тел. +38 (067) 447 04 90, эл. почта voytktivsv@ukr.net, ORCID 0000-0002-7789-2081

АНАЛИЗ КОМПОНОВОЧНЫХ СХЕМ СПАЛЬНЫХ ВАГОНОВ

Цель. В работе предусмотрена разработка, анализ и выбор компоновочных схем пассажирских вагонов по количеству и размещению тамбуров и санитарных помещений общего пользования для создания перспективных конкурентоспособных спальных купейных вагонов существенно высших уровней комфортабельности и оценка перспективности освоения их серийного производства из условия обеспечения максимальной вместимости. **Методика.** Анализ компоновочных схем и планировок существующих спальных купейных вагонов различных европейских производителей и компоновочных схем для создания перспективных вагонов этого типа по размерным параметрам, количеству и размещением тамбуров и санитарных помещений общего пользования проведен по определенным критериям и показателям эффективности предлагаемых конструктивных решений и комфортабельности вагонов. **Результаты.** Разработаны компоновочные схемы для проектирования перспективных конкурентоспособных спальных купейных вагонов, оборудованных двумя или одним тамбуром и тремя-четырьмя санитарными помещениями общего пользования – туалетами, туалетами, совмещенными с душевыми стойками или душевыми кабинами, и отдельными душевыми кабинами. Предложена методика оценки эффективности предложенных конструктивных решений и комфортабельности перспективных спальных купейных вагонов по количеству, назначению и размещению санитарных помещений разного назначения и удобству пользования ими пассажирами. На основе проведенного анализа предложенных компоновочных схем выбраны их оптимальные варианты, рекомендованные для создания перспективных конкурентоспособных спальных купейных вагонов существенно высшего уровня комфортабельности. **Научная новизна.** Впервые проведен анализ существующих и новых компоновочных схем пассажирских спальных купейных вагонов по количеству и размещению тамбуров и по количеству, типу и размещению санитарных помещений общего пользования на основе разработанной методики объективной оценки эффективности компоновочных решений, уровней комфортабельности вагонов и удобства пользования ими пассажирами. **Практическая значимость.** Проведенный анализ дает возможность обоснованного выбора уже на стадии разработки эскизных предложений оптимальных компоновочных схем для создания перспективных конкурентоспособных спальных купейных вагонов разных классов повышенной комфортабельности в сравнении с вагонами-аналогами.

Ключевые слова: спальный вагон; компоновочная схема; критерии комфортабельности вагонов; конкурентоспособность спальных вагонов

S. V. VOYTKIV^{1*}

^{1*}Scientific and Technical Center «Autopoliprom» Ltd., Zubrivska St., 32/24, Lviv, Ukraine, 79066, tel. +38 (067) 447 04 90, e-mail voytktivsv@ukr.net, ORCID 0000-0002-7789-2081

ANALYSIS OF LAYOUT SCHEMES OF SLEEPING CARS

Purpose. The purpose of the work is the development, analysis and selection of layout schemes for passenger cars according to the number and location of enclosed platforms and sanitary facilities for creating promising competitive sleeping cars of various comfort levels and assessing the prospects of mastering their mass production in terms of ensuring maximum capacity. **Methodology.** An analysis of the layout schemes and planning of existing sleeping cars of various European manufacturers and layout schemes of promising cars in terms of size, number and placement of enclosed platforms and sanitary facilities was carried out according to the proposed criteria and per-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

formance for the efficiency of design solutions and the comfort of cars. **Findings.** Designed layout schemes of promising sleeping cars equipped with two or one enclosed platform and three or four sanitary facilities for general use – lavatory rooms, lavatory rooms combined with shower racks or shower cabins and separate shower cabins. A technique is proposed for assessing the efficiency of the developed design solutions and the comfort of promising sleeping cars in terms of the number, purpose and location of sanitary facilities and the ease of their use by passengers. Based on the analysis of the proposed layout schemes, their optimal variants were selected, recommended for creating promising competitive sleeping cars of a substantially higher comfort level. **Originality.** For the first time, an analysis of existing and new layout schemes of passenger sleeping cars by the number and placement of enclosed platforms and the number, types and placement of public sanitary facilities based on the developed methodology for an objective assessment of the efficiency of layout solutions, levels of car comfort and ease of their use by passengers. **Practical value** of the work lies in the possibility of a reasonable choice already at the stage of development of outline proposals for optimal layout schemes for creating promising competitive sleeping cars of different classes of increased comfort levels.

Keywords: sleeping car; layout scheme; criteria for cars comfort; competitive ability of sleeping cars

REFERENCES

1. Vil'k, M. F., Yudaeva, O. S., Aksenov, V. A., Ponomarev, V. M., Apattsev, V. I., Sorokina, V. A., Prostomolotova, V. B., Kozlov, A. S., & Latynin, E. O. (2017). Analysis of harmful production factors at the workplace of a passenger wagon conductor. *Health Risk Analysis*, 4, 97-107. DOI: <https://doi.org/10.21668/health.risk/2017.4.11> (in Russian)
2. Vojtkiv, S. V. (2020). Assessment methodology of comfort level of passenger compartment sleeping cars. *Science and Transport Progress*, 1(85), 44-55. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2020/200751> (in Russian)
3. Donchenko, A. V., Trotskiy, M. V., Krupa, A. G., & Reydemeyster, G. V. (2007). Tipazh perspektivnykh passazhirskikh vagonov lokomotivnoy tyagi dlya magistralnykh zheleznykh dorog Ukrainy. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 14, 132-135. (in Russian)
4. *Vahony pasazhyrski mahistralni lokomotyvnoi tiahny. Vymohy bezpeky*, 24 DSTU 4049-2001. (2001). (in Ukrainian)
5. Informatsiia pro Ukrainski zaliznytsi. Zaliznychnyi transport. *Ministerstvo infrastruktury Ukrainy: ofitsiyniy veb-sait*. Retrieved from <https://cutt.ly/quLbqWa> (in Ukrainian)
6. Koroleva, A. M., Ponomarev, V. M., Wilk, M. F., Yudaeva, O. S., & Filippov, V. N. (2018). Analysis of passenger cars comfort and its influence on the labor activity of railway complex workers. *XXI vek: itogi proshlogo i problemy nastoyashchego plyus*, 7(2(42)), 50-53. (in Russian)
7. Leksina, A. G., Mineeva, N. I., Morgunov, A. V., Timoshenkova, E. V., Gribov, A. V., Demin, V. N., Khlebnikov, V. G., & Vaskina, M. Yu. (2019). Prognozirovaniye teplovogo komforta proezda passazhiro v salonakh elektropoezdov. Teoriya i praktika. *Gigiena i sanitariya.*, 98(5), 489-493. DOI: <https://doi.org/10.18821/0016-9900-2019-98-5-489-493> (in Russian)
8. Loginova, V. A. (2017). Gigienicheskaya otsenka uslovii truda i professional'nogo riska zdorov'yu rabotnikov na ob'ektakh zheleznodorozhnogo transporta. *Analiz riska zdorov'yu*, 2, 96-101. DOI: <https://doi.org/10.21668/health.risk/2017.2.10> (in Russian).
9. OAO «Tverskoy vagonostroitelnyy zavod». *Modelnyy ryad vypuskaemoy produktsii. Vagony passazhirskie*. Retrieved from <http://tvz.ru/catalog/passenger> (in Russian)
10. Osnovnye printsipy i kriterii tekhnicheskikh trebovaniy k tekhnicheskim sredstvam dlya ispolzovaniya ikh na prostranstve 1520: Dokument 998_314. Verkhovna Rada Ukrainy. *Zakonodavstvo Ukrainy*. Retrieved from https://zakon.rada.gov.ua/laws/show/998_314/sp:max25 (in Russian)
11. PAT «Kryukovskiy vagonostroitelnyy zavod». *Passazhirskoe vagonostroenie. Katalog*. Retrieved from <http://www.kvsz.com/images/catalog/tsn.pdf> (in Russian)
12. Ponomarev, V. M., Sachkova, O. S., & Koroleva, A. M. (2018). Analiz i raschety riskov faktorov trudovoi deyatel'nosti rabotnikov zheleznodorozhnogo kompleksa na zaboлеваemost'. *Nauka y tekhnika transporta*, 3, 108-111 (in Russian)
13. Samarskaya, N. A., & Il'in, S. M. (2018). Obespechenie bezopasnykh uslovii truda i zashchita zdorov'ya rabotnikov zheleznodorozhnogo transporta. *Ekonomika truda*, 5(4), 1329-1346. DOI: <https://doi.org/10.18334/et.5.4.39519> (in Russian)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

14. Sanitarnye pravila po organizacii passazhirskih perevozok na zheleznodorozhnom transporte, 46 SP 2.5.1198-03 (1998). (in Russian)
15. Fediushyn, Yu. M., Loboiko, D. M., Donchenko, A. V., Pshinko, O. M., Prykhodko, V. I., & Shkabrov, O. A. (2005). Analiz svitovykh tendentsii i perspektyv rozvytku pasazhyrskoho vahonobuduvannia. *Bulletin of Dnipropetrovsk National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan*, 7, 25-32. (in Ukrainian)
16. Colino, M., & Rosenstein, E. B. (2012). Preserving Passenger Comfort Through RWI Analysis. *ASME 2012 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, 11, 241-250. DOI: <https://doi.org/10.1115/IMECE2012-85669> (in English)
17. Kapalo, P., Myroniuk, Kh., Domnita, F., & Bacotiu, C. (2018). Monitoring of indoor air in a passenger railway wagons. *SCTP*, 888, 72-78. (in English)
18. Leštinský, L., & Zvolenský, P. (2019). New methods of noise reduction in railway carriages. *Transportation Research Procedia*, 40, 778-783. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2019.07.110> (in English)
19. Moon, J. H., Lee, J. W., Jeong, C. H., & Lee, S. H. (2016). Thermal comfort analysis in a passenger compartment considering the solar radiation effect. *International Journal of Thermal Sciences*, 107, 77-88. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ijthermalsci.2016.03.013> (in English)
20. Osborne, D. J. (1978). Passenger comfort—an overview. *Appl Ergonomics*, 9(3), 131-136. DOI: [https://doi.org/10.1016/0003-6870\(78\)90002-9](https://doi.org/10.1016/0003-6870(78)90002-9) (in English)
21. STADLER. *Overview of references*. Retrieved from <https://www.stadlerrail.com/ru/ssylki/zagruzki/> (in Russian)
22. Zvolenský, P., Grenčík, J., Pultnerová, A., & Kašiar, L. (2017). Research of noise emission sources in railway transport and effective ways of their reduction. *MATEC Web of Conferences*, 107, 1-10. DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201710700073> (in English)

Надійшла до редколегії: 24.01.2020

Прийнята до друку: 25.05.2020

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

УДК: 629.4.083

В. В. ЛАГУТА^{1*}, Ю. Г. КОЗИК^{2*}

^{1*}Каф. «Автоматика та телекомунікації», Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна, вул. Лазаряна, 2, Дніпро, Україна, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, ел. пошта vasilij.laguta@gmail.com, ORCID 0000-0002-4957-9178

^{2*}ТзОВ «Прикладні залізничні технології», вул. Адам-Кляйн-штрассе, 26, Нюрнберг, Німеччина, 90429, тел. +49 (176) 7820 17 35, ел. пошта kozik_yuriy@yahoo.com, ORCID 0000-0002-5212-2953

ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРІОДІВ ВІДНОВЛЕННЯ КОРПУСНОЇ ІЗОЛЯЦІЇ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА ЕД-118А ЗА СПОСТЕРЕЖЕННЯМИ ЗВОРОТНОЇ НАПРУГИ

Мета. За основу мети дослідження ми ставимо поліпшення системи утримування тягового електродвигуна (ТЕД) ЕД-118А за рахунок прогнозування ресурсу корпусної ізоляції та визначення моментів її відновлення, із забезпеченням найменших питомих витрат на ПР–3 та КР–1, з врахуванням ступеня відновлення, використанням даних про стан ізоляції за методом зворотної напруги в процесі експлуатації. **Методика.** Задачу, щодо визначення ресурсу корпусної ізоляції та відповідних моментів її відновлення для тягового електродвигуна сформульовано як задачу оптимізації. Критерієм у задачі служить мінімум питомих витрат на виконання ПР–3 та КР–1 протягом періоду від останнього проведення КР–2 до наступного КР–2. **Результати.** Максимальне значення зворотної напруги та значення введеної інтегральної оцінки кривої зворотної напруги є показниками, що можуть характеризувати стан корпусної ізоляції ТЕД. За показник стану ізоляції взято інтегральну оцінку, яка будується за вимірами зворотної напруги. Заводи, що здійснюють ремонт корпусної ізоляції, мають різну якість відновлення, що впливає на питомі витрати відновлення та ресурс ізоляції. **Наукова новизна.** Процедура оптимізації враховує ступінь відновлення ізоляції під час виконання ПР–3 та КР–1. Моделювання ресурсу ізоляції й періоду відновлення ПР–3 засновано на даних вимірів зворотної напруги корпусної ізоляції залежно від пробігу. **Практична значимість.** Величини інтегрального показника зміни зворотної напруги корпусної ізоляції в поточній процедурі вимірювання, за якого виконують діагностування ТЕД, можуть бути використані для прогнозування ресурсу та моделювання моментів відновлення ізоляції, як і максимальні значення зворотної напруги в поточній процедурі вимірювання відповідно до пробігу локомотива.

Ключові слова: корпусна ізоляція; зворотна напруга; контроль стану ізоляції; система утримування тягового електродвигуна

Вступ

Відмови тягових електричних двигунів (ТЕД) мають різну природу, але відмови тягових двигунів через незадовільний стан ізоляції трапляються досить часто. Особливу увагу, під час обслуговування ТЕД, приділяють корпусній ізоляції. Програма оновлення тягового рухомого складу (ТРС) залізниць на період до 2020 року передбачає необхідність створення сучасних систем обслуговування та ремонту ТРС нового покоління та розробку відповідної нормативної документації, [5].

Серед сучасних досліджень слід відзначити роботи М. Д. Глушенка, М. Г. Дурандіна, В. Н. Попова й А. С. Серебрякова, у яких розг-

лянуто проблеми експлуатаційної діагностики тягових електродвигунів, методи прогнозування стану ізоляції електричних машин та ін. Особливий інтерес викликає робота А. С. Серебрякова в галузі розробки пристрою контролю ізоляції тягових двигунів за зворотною напругою [8].

У роботах [1, 9, 10] розглянуто методи діагностування стану тягових електродвигунів, вплив відмов вузлів локомотивів на вибір системи утримання, використання інтелектуальних технологій під час визначення періодичності проведення технічних оглядів і ремонту рухомого складу.

Нові підходи з питань утримування ізоляції ТЕД знайшли відображення в роботі [3]. У роботі [4] описано основні види старіння ізоляції й дефекти, що в ній виникають, наведено основні методи контролю ізоляції електрообладнання.

Фундаментальною є робота [2] аз теоретичних основ ремонтних впливів на надійність технічних об'єктів, у якій сформульовано ряд задач із визначення їх раціонального утримування. Запропонований у роботі підхід можна застосовувати як для окремих елементів рухомого складу, так і для об'єктів у цілому.

У роботі [12] показано, що ресурс електродвигуна в основному визначається зносом ізоляції.

Удосконалення систем утримування ТЕД. У тому числі й корпусної ізоляції, необхідно призводить до відповідних розробок пристроїв і систем діагностування, [6, 11, 14].

Корисною є публікація [13], у якій автори проводять поетапний вичерпний огляд однієї схеми ізоляції, й дають детальний звіт про стандарти, пов'язані з системами ізоляції. У статті звертається увага на те, що жоден стандарт не може забезпечити гарантію на термін служби й ніякі випробування ізоляції не включають усі робочі умови: термічні, механічні, вплив вологи та хімічний вплив. Як замовник, так і виробники будуть використовувати стандарти, знаючи, що такі документи не можуть повністю задовольнити їхні побажання. Автори підкреслюють, що протягом останніх 20-ти років спостерігається тенденція поліпшення якості ізоляції й деякі досягнення в удосконаленні стандартів.

Моделі, що стосуються прогнозування ресурсу ізоляції ТЕД, дослідники однозначно не визначають. Ресурс (життєвий цикл) моделюють як напрацювання (час) між сусідніми неусувними відмовами. Вихідними даними при цьому є інформація про відмови протягом деякого часу експлуатації.

Моделі відновлення корпусної ізоляції, запропоновані в проаналізованих публікаціях, базуються на випадкових потоках відмов (пробіт ізоляції) і не враховують поточний стан ізоляції та ступінь відновлення (технологію відновлення).

Мета

За основну мету дослідження ми ставимо покращення системи утримування ТЕД ЕД–118А за рахунок прогнозування ресурсу корпусної ізоляції та визначення моментів її відновлення, із забезпеченням найменших питомих витрат на ПР–3 та КР–1, з урахуванням ступеня відновлення, використання даних про стан ізоляції за методом зворотної напруги [12] в процесі експлуатації.

Методика

Одним з ефективних неруйнівних методів контролю стану корпусної ізоляції ТЕД є метод, заснований на використанні явища абсорбції. Відомо, що про стан ізоляції та ступінь її старіння судять за струмом абсорбції. Контроль заряду абсорбції за струмом не дуже зручний, оскільки струм абсорбції малий, через що створюється довшими промисловими перешкодами. Тому на практиці застосовують метод вимірювання напруги саморозряду та зворотної напруги.

За вимірними значеннями напруги саморозряду та зворотної напруги можна судити про стан корпусної ізоляції безпосередньо. За рахунок різної поляризації шарів від джерела напруги до ізоляції протягом нетривалого часу протікає струм абсорбції. За рахунок струму абсорбції на границі розділу шарів накопичується об'ємний заряд внутрішнього поглинання (заряд абсорбції). Про процес абсорбції можна судити не тільки за струмом абсорбції, але й за накопиченим (поглиненим) зарядом абсорбції, який утворює зворотну напругу.

Дослідження, у якому спостерігається зворотна напруга, полягає в тому, що неоднорідна ізоляція заряджається протягом деякого часу за постійної (номінальної) напруги U_0 , щоб у ній накопичився заряд абсорбції. Потім ізоляція відключається від джерела постійної напруги, і її електроди (провід та «корпус») коротко замикаються на малий проміжок часу Δt , після чого знову розмикаються. За час Δt геометрична ємність ізоляції повністю розряджається, а заряд абсорбції, накопичений на границі шарів, залишається практично незмінним. Цей

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

заряд розподіляється на ємність ізоляції і заряджає її. Після розмикання зовнішніх електродів ізоляція буде розряджатися на опір своїх шарів. На ізоляції з'явиться напруга. Цю напругу й називають зворотною напругою U_{ret} . У [11] наведено пристрій, що дозволяє виміряти зворотну напругу ТЕД.

За оцінку стану корпусної ізоляції ТЕД ЕД–118А в роботі використано дані замірів значень зворотної напруги $U_{ret}(t)$, t – час, для різних значень пробігу локомотива.

Якість стану ізоляції будемо оцінювати показником $U_{ret}^{max}(l)$ – максимальне значення зворотної напруги в поточній процедурі вимірювання відповідно до пробігу локомотива l :

$$U_{ret}^{max}(l) = \max_t U_{ret}(t); \quad t \in [0, t_{eval}], \quad (1)$$

та інтегральним показником [11]

$$A(l) = \int_0^{t_{eval}} U_{ret}(t) dt; \quad t_{eval} = t_r + t_{midl}, \quad (2)$$

де l – пробіг локомотива, за якого виконують діагностування ТЕД; t_{eval} – час оцінювання зворотної напруги, визначається з рівняння:

$$U_{ret}(t_{eval}) = 0.5 \cdot U_{ret}^{max}(l), \quad (3)$$

де t_r – час наростання зворотної напруги до величини $U_{ret}^{max}(l)$; t_{midl} – значення часу саморозрядження від часу t_r до величини зворотної напруги $0.5 \cdot U_{ret}^{max}(l)$.

Заміри величин зворотної напруги $U_{ret}(t)$, інтегральної оцінки $A(l)$ виконано приладом [11]. Спостереження проведено для групи ТЕД, що встановлені на тепловозах серії 2ТЕ–116 депо «М» РФ «Придніпровська залізниця» за різних значень пробігу l (напрацювання).

Заміри зворотної напруги $U_{ret}(t)$ та відповідної величини інтегральної оцінки (2) проведено для ТЕД, що проходили капітальний ремонт КР–1 на локомотиворемонтному заводі «Завод 1», електровозоремонтному заводі «Завод 2» та електромеханічному ремонтному заводі «За-

вод 3». Залежність значень інтегральної оцінки $A(l)$ для одного ТЕД від пробігу наведено на рис. 1.

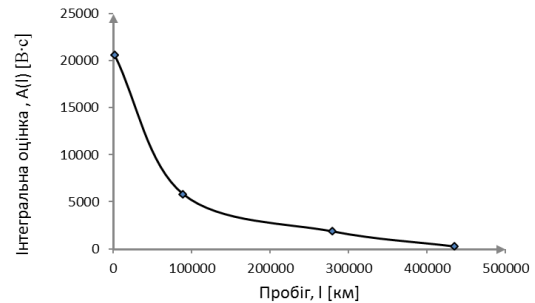


Рис. 1. Залежність значень інтегральної оцінки $A(l)$ від пробігу для одного ТЕД

Fig. 1. Dependence of values of integral estimate $A(l)$ on mileage for one TM

Якщо величину зворотної напруги $U_{ret}^{max}(l)$ та інтегральну оцінку $A(l)$ розглядати як характеристики процесу старіння корпусної ізоляції (або як показники поступової відмови), то їх можна описати виразами:

$$U_{ret}^{max}(l) = U_{ret}^{max}(0) \cdot e^{-al}, \quad a = \text{const}; \quad (4)$$

$$A(l) = A(0) \cdot e^{-bl}, \quad b = \text{const}; \quad (4')$$

у яких параметри a і b визначають із задачі апроксимації експериментальних даних методом найменших квадратів.

Стан корпусної ізоляції під час проведення її діагностування методом зворотної напруги можна характеризувати як максимальним значенням зворотної напруги $U_{ret}^{max}(l)$, так і інтегральним показником $A(l)$.

Відновлення якості корпусної ізоляції можливе в умовах локомотивного депо під час виконання поточного ремонту ПР–3 та в умовах локомотиворемонтного заводу під час проведення капітального ремонту КР–1 та КР–2.

Якщо відновлення властивостей ізоляції буде здійснюватися після КР–2 або нова під час виконання ПР–3 коли ізоляція з періодом відновлення τ , то інтегральну оцінку $A(l)$, з ураху-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

ванням ступеня відновлення корпусної ізоляції, будемо описувати функціональною залежністю у вигляді [2]:

$$A(l) = A(0) \cdot e^{-b \left(l - \gamma \cdot \tau \left[\frac{l}{\tau} \right] \right)}, \quad (5)$$

де $\left[\frac{l}{\tau} \right]$ – ціла частина від $\left(\frac{l}{\tau} \right)$; γ – коефіцієнт (число), що характеризує рівень відновлення ізоляції під час виконання ПР–3.

Надалі вважатимемо, що відлік напрацювання l починається від ремонту КР–2 (або з моменту початку напрацювання, коли ізоляція нова).

Параметри залежності інтегральної оцінки A , зворотної напруги U_{ret}^{max} з урахуванням початкової якості ізоляції (або якості ремонту ТЕД

ЕД–118А локомотиворемонтними заводами) наведено в табл. 1. Параметр b і значення величини $A(0)$ в табл. 1 визначено з розв’язання задачі апроксимації за даними спостережень величин інтегральних оцінок $A(l)$. У звичайній ситуації і в проведених експериментах справжнє значення величин $A(0)$ після відновлення КР–2 для ТЕД невідоме.

У табл. 1: $C_{ПР3}$ – витрати коштів на одне відновлення за ПР–3; $C_{КР1}$ – витрати коштів на відновлення за КР–1; g – коефіцієнт, що характеризує рівень відновлення ізоляції під час виконання КР–1. Величини $C_{ПР3}$ і $C_{КР1}$ – це середні витрати на одне відновлення для певного заводу.

Таблиця 1

Початкові дані: параметри залежності інтегральної оцінки $A(l)$ та витрати коштів на відновлення за ПР–3, КР–1

Table 1

Initial data: dependence parameters of the of the integral estimate $A(l)$ and the cost of restoration for PR-3, MjR-1

Завод	$A(0)$, В·с	γ	b	g	$C_{ПР3}$, грн	$C_{КР1}$, грн
«Завод 1»	20540	0,40	0,00000900	0,71	6520	12648
«Завод 2»	20900	0,55	0,00000947	0,78	6520	14055
«Завод 3»	21180	0,49	0,00001015	0,75	6520	16970

Первинно величину L_{ren1}^* напрацювання до КР–1 визначимо з розв’язання рівняння

$$A(0) \cdot e^{-b \left(L_{ren1}^* - \gamma \cdot \tau \left[\frac{L_{ren1}^*}{\tau} \right] \right)} = A_{min2} \quad (6)$$

відносно L_{ren1}^* . У рівнянні (6) величина A_{min2} є значенням інтегральної оцінки A , що відповідає обмеженню знизу для значень зворотної напруги U_{ret}^{max} . Остаточну величину напрацювання до КР–1 визначимо так:

$$L_{ren1} = \begin{cases} L_{ren1}^* \\ (n+1) \cdot \tau \end{cases}, \quad (7)$$

де n – кількість відновлень ПР–3 до КР–1.

Значення $L_{ren1} = L_{ren1}^*$ беремо, коли різниця $\theta = L_{ren1}^* - (n+1) \cdot \tau$ становить величину, близьку до τ . Термін «близька» не означає «приблизно дорівнює» і залежить більше від людського фактора. Задачу про прийняття рішення, що стосується вибору значення L_{ren1} , у статті не розглядаємо. Інакше кажучи, якщо величина пробігу θ економічно вигідна після проведення

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

останнього ПР–3, тоді $L_{ren1} = L_{ren1}^*$, в іншому випадку в момент напрацювання, що відповідає останньому ПР–3, буде здійснено КР–1, і тоді $L_{ren1} = (n+1) \cdot \tau$.

Моделювання моментів відновлення до КР–2 відбувається з урахуванням отриманих результатів моделювання відновлення до КР–1. Первинно величину напрацювання до КР–2 L_{ren2}^* визначаємо з рівняння

$$A(0) \cdot e^{-b(L_{ren2}^* - L_{ren1} + \Delta l - \tau \cdot g \cdot m)} = A_{min2} \quad (8)$$

відносно L_{ren2}^* . У рівнянні (8) m – кількість відновлень ПР–3 від моменту КР–1 до КР–2; Δl – прирощення за пробігом відповідно до рівня відновлення під час виконання КР–1 (залежить від коефіцієнта відновлення ізоляції g). Величину Δl визначаємо з розв'язання рівняння

$$A(0) \cdot e^{-b \cdot \Delta l} = g \cdot A(0) \quad (9)$$

відносно Δl . Остаточну величину напрацювання до КР–2 визначається так:

$$L_{ren2} = \begin{cases} L_{ren2}^* \\ L_{ren1} + (m+1) \cdot \tau \end{cases} \quad (10)$$

Вираз (10) аналогічний виразу (7). Розглянемо різницю $\delta = L_{ren2}^* - L_{ren1} - (m+1) \cdot \tau$. У випадку, якщо величина пробігу δ економічно вигідна після проведення останнього ПР–3 після КР–1, то $L_{ren2} = L_{ren2}^*$, в іншому випадку в момент напрацювання, що відповідає останньому ПР–3, буде здійснено КР–2 і

$$L_{ren2} = L_{ren1} + (m+1) \cdot \tau. \quad (10')$$

Результати

За фіксованої періодичності, коли $\tau = 180\,000$ км [7], та з урахуванням обмеження на зворотну напругу значення можливого пробігу L_{ren2} (напрацювання до КР–2) по заводах наведено в табл. 2.

Під час моделювання моментів відновлення (табл. 2) вводиться обмеження знизу у вигляді зони (A_{min1}, A_{min2}), що є обмеженням значень

інтегрального показника якості ізоляції в розрахунках. Величина $A_{min1} = 950$ [В·с] відповідає величині зворотної напруги в 30 В, а величина $A_{min2} = 750$ [В·с] – величині в 25 В. Величини A_{min1}, A_{min2} було обрано з урахуванням досвіду експлуатації, безпеки руху й досліджень [11].

Як бачимо з розрахунків (табл. 2), за однакових представлених періодів відновлення τ й кількості відновлень, на якість корпусної ізоляції впливає й обрана технологія відновлення. Перед замовником (депо) постає задача про прийняття рішення щодо вибору виконавця для проведення відновлювальних робіт. Результати моделювання (послідовність відновлень та прогнозування ресурсу), що відповідають табл. 2, подано на рис. 2–4.

Таблиця 2

Прогнозування напрацювання відновлення до КР–1 та до КР–2 заводах за періодичності відновлення $\tau = 180\,000$ км (за Правилами [7])

Table 2

Forecasting the work to restoration to OR-1 and OR-2 factories with the frequency of restoration $\tau = 180\,000$ km (according to the Rules [7])

Завод відновлення ізоляції	Напрацювання до КР–1 L_{ren1} , км	Напрацювання до КР–2 L_{ren2} , км	Витрати коштів $C_{пвз}(n,m) + C_{кр}$, грн	Питомі витрати, коп/км
«1»	513 715	988 164	38 728	3,91
«2»	540 000	1 080 000	40 115	3,71
«3»	540 000	1 052 015	43 050	4,09

На рис. 3 й 4 зображено функцію відновлень-зносу корпусної ізоляції. Функція відновлень-зносу є залежністю інтегрального показника стану ізоляції від напрацювання. У точках, що відповідають моментам відновлення, функція має розриви першого роду. Коридор із прямих ліній відповідає прийнятому обмеженню в задачі оптимізації на величину зворотної напруги відповідно 25 і 30 В.

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

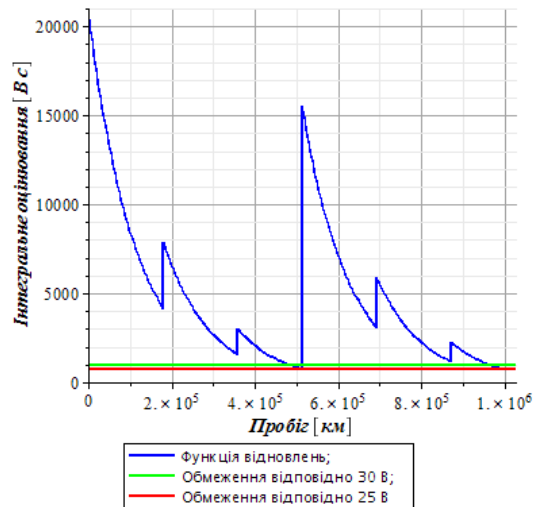


Рис. 2. Прогнозування ресурсу та моменти відновлень до КР-2 за Правилами [7], технологія відновлення – «Завод 1». Моменти відновлення, км: 180 000 – ПР-3; 360 000 – ПР-3; 513 715 – КР-1; 693 715 – ПР-3; 873 715 – ПР-3; 988 164 – КР-2

Fig. 2. Forecasting the service life and moments of restoration to MjR-2 according to the Rules [7], restoration technology – «Factory 1». Moments of recovery, km: 180 000 – PR-3; 360 000 – PR-3; 513 715 – MjR-1; 693 715 – PR-3; 873 715 – PR-3; 988 164 – MjR-2

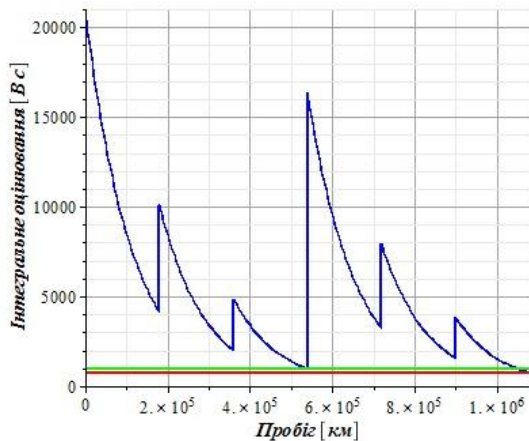


Рис. 3. Прогнозування ресурсу та моменти відновлень до КР-2 за Правилами [7], технологія відновлення – «Завод 2». Моменти відновлення, км: 180 000 – ПР-3; 360 000 – ПР-3; 540 000 – КР-1; 720 000 – ПР-3; 900 000 – ПР-3; 1 080 000 – КР-2

Fig. 3. Forecasting the service life and moments of restoration to MjR-2 according to the Rules [7], restoration technology – «Factory 1». Moments of recovery, km: 180 000 – PR-3; 360 000 – PR-3; 540 000 – MjR-1; 720 000 – PR-3; 900 000 – PR-3; 1 080 000 – MjR-2

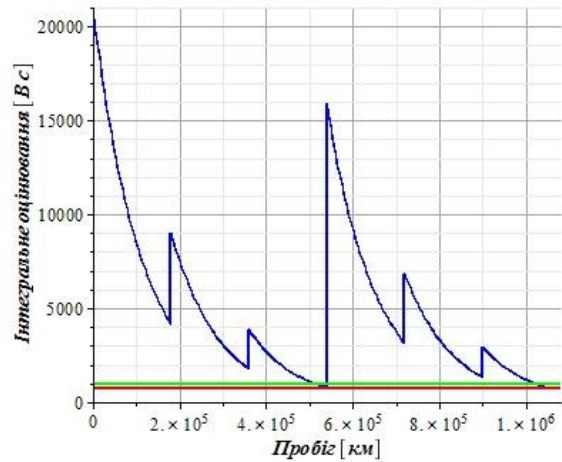


Рис. 4. Прогнозування ресурсу та моменти відновлень до КР-2 за Правилами [7], технологія відновлення – «Завод 3». Моменти відновлення, км: 180 000 – ПР-3; 360 000 – ПР-3; 540 000 – КР-1; 720 000 – ПР-3; 900 000 – ПР-3; 1 052 015 – КР-2

Fig. 4. Forecasting the service life and moments of restoration to MjR-2 according to the Rules [7], restoration technology – «Factory 3». Moments of recovery, km: 180 000 – PR-3; 360 000 – PR-3; 540 000 – MjR-1; 720 000 – PR-3; 900 000 – PR-3; 1 052 015 – MjR-2

Рішення щодо вибору моментів відновлення корпусної ізоляції й відповідного ресурсу визначимо з розв'язання наступної задачі оптимізації. Для ремонтних заводів визначимо варіанти відновлення такі, які мінімізують суму питомих витрат на відновлення ПР-3 та КР-1 за період експлуатації від КР-2 (або новий ТЕД) до наступного КР-2. Сформулюємо задачу. Нехай τ – період відновлення ізоляції, n – кількість відновлень ПР-3 до КР-1, m – кількість відновлень ПР-3 від КР-1 до КР-2, тоді

$$\min_{\tau, n, m} \frac{C(\tau, n, m)}{L_{ren2}(\tau, n, m)}, \quad \tau \in T, \quad n, m \in M, \quad (11)$$

за обмеження:

$$L_{ren2}(\tau, n, m) \geq L_{min}, \quad (12)$$

де $C(\tau, n, m)$ – сума витрат на виконання відновлень усіх ПР-3 та КР-1; M – обмежена безліч натуральних чисел; T – безліч наперед заданих періодів відновлення ізоляції; $L_{ren2}(\tau, n, m)$ – напрацювання ізоляції до КР-2; L_{min} – мініма-

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

льно допустимий пробіг (напрацювання) ТЕД, беремо відповідно до [7] як величину 990 000 км.

Функція цілі $C(\tau, n, m)$ є сумою витрат на всі визначені під час моделювання відновлення всіх ПР–3 і КР–1 за період експлуатації від КР–2 (або новий ТЕД) до наступного КР–2. Мова йде про загальні питомі витрати на відновлення тільки корпусної ізоляції одного ТЕД.

У задачі взято: $M = \{1, 2, 3, 4, 5\}$; $T = \{\tau_i\}, i = \overline{1, K}$ – дискретна безліч періодів відновлення, τ_i – періоди відновлення ізоляції, що задаються наперед під час розв’язання задачі. Розв’язання задачі значно спрощується тим, що оптимізацію виконують на рахункових, обмежених безлічах T і M . Дискретна безліч періодів відновлення вибрана тому, що функція цілі $C(\tau, n, m)$ не є безперервною функцією, що ускладнює використання методів типу градієнтних під час розв’язання поставленої оптимізаційної задачі. Значення періодів відновлення τ_i для різних ремонтних заводів відрізняються.

Оптимізацію питомих витрат із прогнозуванням ресурсу корпусної ізоляції за технологією відновлення «Завод 1» проведено для безлічі періодів відновлення, тис. км, $T = \{180, 150, 120, 250, 300, 320, 350, 360\}$.

Отримано такий результат із мінімізації питомих витрат: кількість відновлень ПР–3 $(n+m) = (1+1)$; напрацювання до КР–2 $L_{ren2} = 990\,430$ км; загальні витрати на відновлення $C(\tau, n, m) = 25\,688$ грн; найменші питомі витрати склали 2,59 коп/км; період відновлення $\tau = 360\,000$ км. Моменти відновлення, км: 360 000 – ПР–3; 513 715 – КР–1; 873 715 – ПР–3.

Оптимізацію питомих витрат із прогнозуванням ресурсу корпусної ізоляції за технологією відновлення «Завод 2» проведено для безлічі періодів відновлення, тис. км, $T = \{120, 150, 180, 240, 250, 300, 350, 360\}$.

Отримано такий результат із мінімізації питомих витрат: кількість відновлень ПР–3 $(n+m) = (1+1)$; напрацювання до КР–2 $L_{ren2} = 1\,108\,430$ км; загальні витрати на відновлення $C(\tau, n, m) = 25\,688$ грн; найменші питомі

витрати склали 2,32 коп/км; період відновлення $\tau = 360\,000$ км. Моменти відновлення, км: 360 000 – ПР–3; 542 515 – КР–1; 902 515 – ПР–3.

Оптимізацію питомих витрат із прогнозуванням ресурсу корпусної ізоляції за технологією відновлення «Завод 3» проведено для безлічі періодів відновлення, тис. км, $T = \{120, 150, 180, 240, 250, 300, 320, 360\}$.

Отримано наступний результат з мінімізації питомих витрат: кількість відновлень ПР–3 $(n+m) = (1+1)$; напрацювання до КР–2 $L_{ren2} = 1\,049\,730$ км; загальні витрати на відновлення $C(\tau, n, m) = 25\,688$ грн; найменші питомі витрати склали 2,45 коп/км; період відновлення $\tau = 360\,000$ км. Моменти відновлення, км:

360 000 – ПР–3; 567 715 – КР–1; 927 715 – ПР–3;

Варіанти оптимальних відновлень ізоляції для поставленої задачі оптимізації зведено в табл. 3 для подальшого аналізу.

Порівнюючи, відповідно до поставленої задачі оптимізації, величини питомих витрат на відновлення, можна побачити певну тенденцію. На величини питомих витрат впливає технологія відновлення, прийнята на відповідному заводі, де відбувається відновлення. Як видно з табл. 3, найкращу технологію відновлення має «Завод 2».

Таблиця 3

Зведена таблиця аналізу оптимальних варіантів технологій відновлення корпусної ізоляції по заводах

Table 3

Summary table of analysis of optimal variants of restoration technologies of case isolation on factories

Завод відновлення КР–1, КР–2	Періодичність відновлення τ , км	Кількість відновлень ПР–3 $(n+m)$	Напрацювання до КР–2 L_{ren2} , км	Питомі витрати, коп/км
«1»	360 000	1+1	990 430	2,59
«2»	360 000	1+1	1 108 430	2,32
«3»	360 000	1+1	1 049 730	2,45

Наукова новизна та практична значимість

Процедура оптимізації враховує ступінь відновлення ізоляції під час виконання ПР–3 та КР–1. Моделювання ресурсу ізоляції й періоду відновлення ПР–3 засновано на даних вимірів зворотної напруги корпусної ізоляції залежно від пробігу. Максимальне значення зворотної напруги та значення введеної інтегральної оцінки можуть бути використані як показники, що характеризують стан корпусної ізоляції ТЕД.

Величини інтегрального показника $A(l)$ зміни зворотної напруги корпусної ізоляції в поточній процедурі вимірювання, де l – пробіг локомотива, за якого виконують діагностування ТЕД, можуть бути використані для прогнозування ресурсу та моделювання моментів відновлення ізоляції, як і величини зворотної напруги $U_{ret}^{max}(l)$ – максимальне значення зворотної напруги в поточній процедурі вимірювання відповідно до пробігу локомотива l .

Висновки

Визначено оптимальне напрацювання корпусної ізоляції ТЕД ЕД–118А за питомими витратами на відновлення як технічного об'єкта з поступовими відмовами з урахуванням технології відновлення. Отримано відповідні моменти відновлення. Моделювання моментів відновлення та прогнозування ресурсу корпусної ізоляції здійснено без урахування впливів випадкових відмов ізоляції. За статистичними даними та обраним методом прогнозування ресурсу визначено, що найкращу технологію відновлення має «Завод 2». Отримані результати прийнятні до конкретних умов експлуатації. Важливо дотримуватися припущення, що умови експлуатації ТЕД не змінювалися зі зміною напрацювання. Останнє означає, що вагові норми, полігон обороту й організація руху за період спостереження та збору інформації не змінювалися.

Під час застосування описаного методу прогнозування ресурсу корпусної ізоляції необхідна велика кількість даних про стан корпусної ізоляції ТЕД, який експлуатується тривалий час. Крім того, час, протягом якого виконують оцінку стану ізоляції двигуна, досить значний.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Боднар Б. Є., Очкасов О. Б., Черняєв Д. В., Шевченко І. Я. Діагностування тягових електродвигунів за нерівномірністю обертання якоря. *Наука та прогрес транспорту*, 2013. № 3 (45). С. 13–21.
2. Босов А. А., Лоза П. А. *Теоретические основы рационального содержания подвижного состава железных дорог* : монографія. Днепропетровск : Дриант, 2015. 252 с.
3. Гиоев З. Г. *Основы виброакустической диагностики тяговых приводов локомотивов*: дис. ... д-ра техн. наук. Ростов-на Дону, 1998. 367 с.
4. Касаткин Г. С., Федотов В. В. Контроль изоляции электро-технических устройств : учебное пособие. Москва : МИИТ, 2009. 56 с.
5. Комплексна програма оновлення залізничного рухомого складу на 2008–2020 роки. URL: <http://pravda.tis.ua/pravda/?p=2200> (дата звернення 16.03.2020).
6. Лагута В. В., Сердюк Т. Н. Моделирование эффективной системы диагностирования тягового электродвигателя с учетом выбора вариантов комплектации его элементов. *Транспортні системи та технології перевезень*. 2017. № 13. С. 52–58. DOI: <https://doi.org/10.15802/tstt2017/110769>
7. *Правила ремонту электрических машин тепловозів* : № ЦТ-0064 : затв. наказ Укрзалізниці від 23.02.03 р. № 53-Ц. Київ, ТОВ Видавничий дім «САМ», 2003. 148 с.
8. Серебряков А. С. *Электротехническое материаловедение. Электроизоляционные материалы* : учебное пособие для вузов ж. д. транспорта. Москва : Маршрут, 2005. 280 с.
9. Barré O., Napame B. The Insulation for Machines Having a High Lifespan Expectancy, Design, Tests and Acceptance Criteria Issues. *Machines*. 2017. Vol. 5. Iss. 1. P. 1–34. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines5010007>

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

10. Bodnar B. E., Ochkasov O. B., Hryshechkina T. S., Bodnar E. B. Choosing the system of locomotive maintenance in view of the effect of dependent failures. *Science and Transport Progress*. 2018. № 6 (78). P. 47–58. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/154823>
11. Kapitsa M., Laguta V., Kozik Y. Selecting the Parameters of The Diagnosis of Frame Insulation Condition in Electrical Machines of Locomotives. *International Journal of Engineering & Technology*. 2018. Vol. 7. Iss. 4. 3. P. 110–114. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19718>
12. Nefedov R., Loginov E. Investigation of wear of insulation of traction engines of locomotives in operation. *ITM Web of Conferences*. 2018. Vol. 18. P. 1–3. DOI: <https://doi.org/10.1051/itmconf/20181801006>
13. Ochkasov O., Shvets O., Cerniauskaite L. Usage of intelligent technologies in choosing the strategy of technical maintenance of locomotives. *Technologijos ir Menas = Technology and Art*. 2017. № 8. P. 68–71.
14. Serdiuk T., Feliziani M., Serdiuk K. About electromagnetic compatibility of track circuits with the traction supply system of railway. *2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*. 2018. P. 242–247. DOI: <https://doi.org/10.1109/emceurope.2018.8485034>

В. В. ЛАГУТА^{1*}, Ю. Г. КОЗИК^{2*}

^{1*}Каф. «Автоматика и телекоммуникации», Днепропетровский национальный университет железнодорожного транспорта имени академика В. Лазаряна, ул. Лазаряна, 2, Днипро, Украина, 49010, тел. +38 (056) 373 15 04, эл. почта vasilij.laguta@gmail.com, ORCID 0000-0002-4957-9178

^{2*}ООО «Прикладные железнодорожные технологии», ул. Адам-Кляйн-штрассе, 26, Нюрнберг, Германия, 90429, тел. +49 (176) 782 01 735, эл. почта kozik_yuriy@yahoo.com, ORCID 0000-0002-5212-2953

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОРПУСНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ТЭД ЭД-118А ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ВОЗВРАТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Цель. В качестве основной цели исследования мы ставим улучшение системы содержания тягового электродвигателя (ТЭД) ЭД–118А за счет прогнозирования ресурса корпусной изоляции и определения моментов ее восстановления, с обеспечением наименьших удельных затрат на ТР–3 и КР–1, с учетом степени восстановления, использованных данных о состоянии изоляции в соответствии с методом возвратного напряжения в процессе эксплуатации. **Методика.** Задача по определению ресурса корпусной изоляции и соответствующих моментов ее восстановления для тягового электродвигателя сформулирована как задача оптимизации. Критерием в задаче служит минимум суммарных удельных затрат на выполнение ТР–3 и КР–1 на протяжении периода от последнего проведения КР–2 до следующего КР–2. **Результаты.** Максимальное значение возвратного напряжения и значение введенной интегральной оценки кривой возвратного напряжения являются показателями, которые могут характеризовать состояние корпусной изоляции ТЭД. В качестве показателя состояния изоляции принята интегральная оценка, которая строится по замерам возвратного напряжения. Заводы, осуществляющие ремонт корпусной изоляции, имеют разное качество ее восстановления, что влияет на удельные затраты восстановления и ресурс изоляции. **Научная новизна.** Процедура оптимизации учитывает степень восстановления изоляции при выполнении ТР–3 и КР–1. Моделирование ресурса изоляции и периода восстановления ТР–3 основано на данных измерений возвратного напряжения корпусной изоляции в зависимости от пробега. **Практическая значимость.** Величины интегрального показателя изменения возвратного напряжения корпусной изоляции в текущей процедуре измерения, при котором выполняют диагностирование ТЭД, могут быть использованы для прогнозирования ресурса и моделирования моментов восстановления изоляции, как и максимальные значения возвратного напряжения в текущей процедуре измерения в соответствии с пробегом локомотива.

Ключевые слова: корпусная изоляция; возвратное напряжение; контроль состояния изоляции; система содержания тягового электродвигателя

V. V. LAGUTA^{1*}, Y. H. KOZIK^{2*}

^{1*}Dep. «Automation and Telecommunications», Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan, Lazaryana St., 2, Dnipro, Ukraine, 49010, tel. (056) 373 15 04, e-mail vasilij.laguta@gmail.com, ORCID 0000-0002-1941-4751

^{2*}LLC «Applied Railway Technologies», Adam-Klein St., 26, Nürnberg D-90429, Germany, tel. +49 (176) 782 01 735, e-mail kozik_yuriy@yahoo.com, ORCID 0000-0002-5212-2953

DETERMINATION OF A RESTORATION PERIODS OF A FRAME INSULATION OF TM ED-118A BY RECOVERY VOLTAGE OBSERVATIONS

Purpose. The aim of the research is to improve the maintenance system of a traction motor (TM) ED-118A by predicting the life of a frame insulation and determining recovery moments while ensuring the lowest unit costs for performing a major repairs of a volume 1 (MjR-1) and permanent repair of a volume 3 (PR-3), taking into account the degree of recovery, using data on the insulation state by the recovery voltage method in the operation process. **Methodology.** The problem of determining the service life of the frame insulation and the corresponding moments of its recovery for the traction motor is formulated as an optimization problem. The criterion in the task is the minimum of the total unit costs for the implementation of PR-3 and MjR-1 during the period from the last MjR-2 (a major repairs of a volume 2) to the next MjR-2. **Findings.** The maximum value of the recovery voltage and the value of the integral estimate introduced are indicators characterizing the state of the frame insulation of the TM. As an indicator of the insulation state, an integral estimate is adopted, which is constructed by measuring the recovery voltage. Factories carrying out repairs of frame insulation have different quality of its restoration, which affects the unit cost of restoration and insulation service life. **Originality.** The optimization procedure takes into account the degree of insulation recovery when performing PR-3 and performing MjR-1. Modeling of the insulation service life and the recovery period of the PR-3 is based on measurements of the recovery voltage of the casing insulation, depending on the mileage. **Practical value.** The values of the integral indicator considered in the problem, changes in the recovery voltage of the casing insulation in the current measurement procedure, at which MT diagnostics are performed, can be used to predict the service life and simulate the moments of insulation recovery, as well as the maximum values of the recovery voltage in the current measurement procedure in accordance with mileage of a locomotive.

Keywords: frame insulation; return voltage; insulation state control; traction motor maintenance system

REFERENCES

1. Bodnar, B. Ye., Ochkasov, A. B., Chernyayev, D. V., & Shevchenko, Ya. I. (2013). Diagnosis of traction electric motor at irregularity in speed of anchor rotation. *Science and Transport Progress*, 3(45), 13-21. (in Ukrainian)
2. Bosov, A. A., & Loza, P. A. (2015). *Teoriticheskie osnovy ratsionalnogo soderzhaniya podvizhnogo sostava zheleznikh dorog: Monografiya*. Dnepropetrovsk: Driant. (in Russian)
3. Gioev, Z. G. (1998). *Osnovy vibroakusticheskoy diagnostiki tyagovykh privodov lokomotivov*. (Dysertatsiia doktora tekhnichnykh nauk). Rostov-on-Don. (in Russian)
4. Kasatkin, G. S., & Fedotov, V. V. (2009). *Kontrol izolyatsii elektro-tekhnikeskikh ustroystv: uchebnoe posobie*. Moscow: MIIT (in Russian)
5. Kompleksna prohrama onovlennja zaliznychnogho rukhomogho skladu na 2008-2020 roky. Retrieved from <http://pravda.tis.ua/pravda/?p=2200> (in Russian)
6. Laguta, V. V., & Serdyuk, T. N. (2017). *Modeling an effective system for diagnosing a traction motor with accounting for selection of its elements assembly options*. *Transport Systems and Transportation Technologies*, 13, 52-58. DOI: <https://doi.org/10.15802/tsst2017/110769> (in Russian)
7. *Pravyla remontu elektrychnykh mashyn teplovoziv*. (2003). TsT-0064: nakaz Ukrzaliznytsi No 53-Ts. Kiev, TOV Vydavnychj dim «SAM». (in Ukrainian)

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

8. Serebryakov, A. S. (2005). *Elektrotekhnicheskoe materialovedenie. Elektroizolyatsionnye materialy: uchebnoe posobie dlya vuzov zheleznodorozhnogo transporta*. Moscow: Marshrut.
9. Barré, O., & Napame, B. (2017). The Insulation for Machines Having a High Lifespan Expectancy, Design, Tests and Acceptance Criteria Issues. *Machines*, 5(1), 1-34. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines5010007> (in English)
10. Bodnar, V. E., Ochkasov, O. B., Hryshechka, T. S., & Bodnar, E. B. (2018). Choosing the system of locomotive maintenance in view of the effect of dependent failures. *Science and Transport Progress*, 6(78), 47-58. DOI: <https://doi.org/10.15802/stp2018/154823> (in English)
11. Kapitsa, M., Laguta, V., & Kozik, Y. (2018). Selecting the Parameters of the Diagnosis of Frame Insulation Condition in Electrical Machines of Locomotives. *International Journal of Engineering & Technology*, 7(4.3), 110-114. DOI: <https://doi.org/10.14419/ijet.v7i4.3.19718> (in English)
12. Nefedov, R., & Loginova, E. (2018). Investigation of wear of insulation of traction engines of locomotives in operation. *ITM Web of Conferences*, 18, 1-3. DOI: <https://doi.org/10.1051/itmconf/20181801006> (in English)
13. Ochkasov, O., Shvets, O., & Cerniauskaite, L. (2017). Usage of intelligent technologies in choosing the strategy of technical maintenance of locomotives. *Technologijos ir Menas=Technology and Art*, 8, 68-71. (in English)
14. Serdiuk, T., Feliziani, M., & Serdiuk, K. (2018). About Electromagnetic Compatibility of Track Circuits with the Traction Supply System of Railway. *2018 International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC EUROPE)*. DOI: <https://doi.org/10.1109/emceurope.2018.8485034> (in English)

Надійшла до редколегії: 31.01.2020

Прийнята до друку: 01.06.2020

ЗМІСТ

ЕКОЛОГІЯ ТА ПРОМИСЛОВА БЕЗПЕКА

**М. М. БІЛЯЄВ, О. В. БЕРЛОВ, В. В. БІЛЯЄВА,
В. А. КОЗАЧІНА, І. В. КАЛАШНІКОВ**
АВАРІЙНЕ ГОРІННЯ ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО
ПАЛИВА: ОЦІНКА РИЗИКУ УРАЖЕННЯ ЛЮДЕЙ
В РОБОЧОМУ ПРИМІЩЕННІ 7

**М. В. ЛЕМЕШ, М. М. БІЛЯЄВ, Л. Г. ТАТАРКО,
З. М. ЯКУБОВСЬКА**
МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСУ БІОЛОГІЧНОГО
ОЧИЩЕННЯ СТІЧНИХ ВОД НА БАЗІ КАМЕРНИХ
МОДЕЛЕЙ 16

ЕКСПЛУАТАЦІЯ ТА РЕМОНТ ЗАСОБІВ ТРАНСПОРТУ

Є. Б. ДЕМЧЕНКО, В. В. МАЛАШКІН, І. Я. СКОВРОН
ДОСЛІДЖЕННЯ ПАРАМЕТРІВ ЗАЛІЗНИЧНИХ
СТАНЦІЙ З ВИКОРИСТАННЯМ МЕРЕЖ ПЕТРІ 25

**Д. М. КОЗАЧЕНКО, О. Ю. ПАПАХОВ,
Ю. М. ГЕРМАНЮК**
РОЗВИТОК МЕТОДІВ ОРГАНІЗАЦІЇ
ВАГОНОПОТОКІВ У РОСІЙСЬКІЙ ІМПЕРІЇ
ТА СРСР 37

В. І. МАЦЮК, В. К. МИРОНЕНКО, Я. П. ПЕТІНОВ
КОНЦЕПЦІЯ РЕГЛАМЕНТУ ДОСТУПУ ПРИВАТНИХ
ПОЇЗНИХ ЛОКОМОТИВІВ ДО ЗАЛІЗНИЧНОЇ
ІНФРАСТРУКТУРИ ЗАГАЛЬНОГО
КОРИСТУВАННЯ 62

ЗАЛІЗНИЧНА КОЛІЯ ТА АВТОМОБІЛЬНІ ДОРОГИ

Д. М. КУРГАН, О. В. ГУБАР, М. О. ГАВРИЛОВ
МЕТОДИКА ІНЖЕНЕРНОГО РОЗРАХУНКУ
КОЕФІЦІЄНТА СТІЙКОСТІ ПРОТИ ВКОЧУВАННЯ
КОЛЕСА НА РЕЙКУ 71

ІНФОРМАЦІЙНО-КОМУНІКАЦІЙНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ

В. М. ПАХОМОВА, М. С. КОННОВ
ДОСЛІДЖЕННЯ ДВОХ ПІДХОДІВ ДО ВИЯВЛЕННЯ
МЕРЕЖНИХ АТАК ІЗ ВИКОРИСТАННЯМ
НЕЙРОМЕРЕЖНОЇ ТЕХНОЛОГІЇ 81

МАТЕРІАЛОЗНАВСТВО

**І. О. ВАКУЛЕНКО, Д. М. БОЛОТОВА,
С. В. ПРОЙДАК, Х. АСКЕРОВ, Х. КУГ,
А. О. ЧАЙКОВСЬКА**
ФОРМУВАННЯ СТРУКТУРИ ВУГЛЕЦЕВОЇ СТАЛІ ПІД
ЧАС ГАРЯЧОЇ ПЛАСТИЧНОЇ ДЕФОРМАЦІЇ 94

МАШИНОБУДУВАННЯ

П. М. ГАЩУК, С. В. НІКІПЧУК
ЕФЕКТИВНІСТЬ РОБОЧИХ ЦИКЛІВ ДВИГУНА
ШВИДКОГО ВНУТРІШНЬОГО ЗГОРЯННЯ
З ПОДОВЖЕНИМ РОБОЧИМ ХОДОМ 105

Р. П. ПОГРЕБНЯК, М. Р. ПОГРЕБНЯК
ПОШУК ТА УСУНЕННЯ ПОВТОРЮВАНИХ ЗВ'ЯЗКІВ
У СХЕМІ НАПРЯМНОГО КРИВОШИПНО-
ПОВЗУНКОВОГО МЕХАНІЗМУ
ЗАХОПЛЮВАЛЬНОГО ПРИСТРОЮ 129

РУХОМИЙ СКЛАД І ТЯГА ПОЇЗДІВ

М. О. БУЛАХ
АНАЛІЗ КОМПОНУВАЛЬНИХ СХЕМ СПАЛЬНИХ
ВАГОНІВ 138

С. В. ВОЙТКІВ
ВИЗНАЧЕННЯ МІЦНОСТІ НЕСУЧОЇ КОНСТРУКЦІЇ
ВАГОНА-ПЛАТФОРМИ ЗЧЛЕНОВАНОГО ТИПУ
З КРУГЛИХ ТРУБ 147

В. В. ЛАГУТА, Ю. Г. КОЗІК
ВИЗНАЧЕННЯ ПЕРІОДІВ ВІДНОВЛЕННЯ КОРПУСНОЇ
ІЗОЛЯЦІЇ ТЯГОВОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА ЕД-118А
ЗА СПОСТЕРЕЖЕННЯМИ ЗВОРОТНОЇ
НАПРУГИ 163

СОДЕРЖАНИЕ

ЭКОЛОГИЯ И ПРОМЫШЛЕННАЯ БЕЗОПАСНОСТЬ

- Н. Н. БЕЛЯЕВ, А. В. БЕРЛОВ, В. В. БЕЛЯЕВА, В. А. КОЗАЧИНА, И. В. КАЛАШНИКОВ**
АВАРИЙНОЕ ГОРЕНИЕ ТВЕРДОГО РАКЕТНОГО ТОПЛИВА: ОЦЕНКА РИСКА ПОРАЖЕНИЯ ЛЮДЕЙ В РАБОЧЕМ ПОМЕЩЕНИИ..... 7
- М. В. ЛЕМЕШ, Н. Н. БЕЛЯЕВ, Л. Г. ТАТАРКО, З. М. ЯКУБОВСКАЯ**
МОДЕЛИРОВАНИЕ ПРОЦЕССА БИОЛОГИЧЕСКОЙ ОЧИСТКИ СТОЧНЫХ ВОД НА БАЗЕ КАМЕРНЫХ МОДЕЛЕЙ 16

ЭКСПЛУАТАЦИЯ И РЕМОНТ СРЕДСТВ ТРАНСПОРТА

- Е. Б. ДЕМЧЕНКО, В. В. МАЛАШКИН, И. Я. СКОВРОН**
ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫХ СТАНЦИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ СЕТЕЙ ПЕТРИ 25
- Д. Н. КОЗАЧЕНКО, А. Ю. ПАПАХОВ, Ю. Н. ГЕРМАНИК**
РАЗВИТИЕ МЕТОДОВ ОРГАНИЗАЦИИ ВАГОНОПОТОКОВ В РОССИЙСКОЙ ИМПЕРИИ И СССР..... 37
- В. И. МАЦЮК, В. К. МИРОНЕНКО, Я. П. ПЕТИНОВ**
КОНЦЕПЦИЯ РЕГЛАМЕНТА ДОСТУПА ЧАСТНЫХ ПОЕЗДНЫХ ЛОКОМОТИВОВ К ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ ИНФРАСТРУКТУРЕ ОБЩЕГО ПОЛЬЗОВАНИЯ 62

ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНЫЙ ПУТЬ И АВТОМОБИЛЬНЫЕ ДОРОГИ

- Д. Н. КУРГАН, А. В. ГУБАРЬ, М. А. ГАВРИЛОВ**
МЕТОДИКА ИНЖЕНЕРНОГО РАСЧЕТА КОЭФФИЦИЕНТА УСТОЙЧИВОСТИ ПРОТИВ ВКАТЫВАНИЯ КОЛЕСА НА РЕЛЬС 71

ИНФОРМАЦИОННО-КОММУНИКАЦИОННЫЕ ТЕХНОЛОГИИ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

- В. Н. ПАХОМОВА, М. С. КОННОВ**
ИССЛЕДОВАНИЕ ДВУХ ПОДХОДОВ К ВЫЯВЛЕНИЮ СЕТЕВЫХ АТАК С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ НЕЙРОСЕТЕВОЙ ТЕХНОЛОГИИ 81

МАТЕРИАЛОВЕДЕНИЕ

- И. А. ВАКУЛЕНКО, Д. М. БОЛОТОВА, С. В. ПРОЙДАК, Х. АСКЕРОВ, Х. КУГ, А. О. ЧАЙКОВСКАЯ**
ФОРМИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ УГЛЕРОДИСТОЙ СТАЛИ ПРИ ГОРЯЧЕЙ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ 94

МАШИНОСТРОЕНИЕ

- П. М. ГАЩУК, С. В. НИКИПЧУК**
ЭФФЕКТИВНОСТЬ РАБОЧИХ ЦИКЛОВ ДВИГАТЕЛЯ БЫСТРОГО ВНУТРЕННЕГО СГОРАНИЯ С УДЛИНЕННЫМ РАБОЧИМ ХОДОМ 105

- Р. П. ПОГРЕБНЯК, М. Р. ПОГРЕБНЯК**
ПОИСК И УСТРАНЕНИЕ ПОВТОРЯЮЩИХСЯ СВЯЗЕЙ В СХЕМЕ НАПРАВЛЯЮЩЕГО КРИВОШИПНО-ПОЛЗУНКОВОГО МЕХАНИЗМА ЗАХВАТЫВАЮЩЕГО УСТРОЙСТВА..... 129

ПОДВИЖНОЙ СОСТАВ И ТЯГА ПОЕЗДОВ

- М. А. БУЛАХ**
УСОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ МЕТОДИКИ ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ДВИЖЕНИЯ ПОЕЗДОВ НА ЖЕЛЕЗНОЙ ДОРОГЕ 138

- С. В. ВОЙТКИВ**
АНАЛИЗ КОМПОНОВОЧНЫХ СХЕМ СПАЛЬНЫХ ВАГОНОВ 147

- В. В. ЛАГУТА, Ю. Г. КОЗИК**
ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПЕРИОДОВ ВОССТАНОВЛЕНИЯ КОРПУСНОЙ ИЗОЛЯЦИИ ТЭД ЭД-118А ПО НАБЛЮДЕНИЯМ ВОЗВРАТНОГО НАПРЯЖЕНИЯ 163

CONTENTS

ECOLOGY AND INDUSTRIAL SAFETY

**M. M. BILIAIEV, O. V. BERLOV,
V. V. BILIAIEVA, V. A. KOZACHYNA,
I. V. KALASHNIKOV**
EMERGENCY BURNING OF SOLID ROCKET
PROPELLANT: DAMAGE RISK ASSESSMENT TO
PEOPLE IN THE WORKPLACE..... 7

**M. V. LEMESH, M. M. BILIAIEV, L. H. TATARKO,
Z. M. YAKUBOVSKA**
MODELING OF THE PROCESS OF BIOLOGICAL
WASTEWATER TREATMENT BASED ON CHAMBER
MODELS 16

OPERATION AND REPAIR OF TRANSPORT MEANS

**Y. B. DEMCHENKO, V. V. MALASHKIN,
I. Y. SKOVRON**
INVESTIGATION OF THE PARAMETERS OF RAILWAY
STATIONS USING PETRI NETS..... 25

**D. M. KOZACHENKO, O. Y. PAPAHOV,
Y. N. HERMANIUK**
DEVELOPMENT OF CAR TRAFFIC VOLUMES
ORGANIZATION METHODS IN THE RUSSIAN EMPIRE
AND IN THE USSR 37

V. I. MATSIUK, V. K. MYRONENKO, Y. P. PETINOV
CONCEPT OF REGULATIONS FOR ACCESS OF
PRIVATE LOCOMOTIVES TO PUBLIC RAILWAY
INFRASTRUCTURE..... 62

RAILROAD AND ROADWAY NETWORK

D. M. KURHAN, O. V. HUBAR, M. O. HAVRILOV
METHODOLOGY FOR ENGINEERING CALCULATION
OF STABILITY COEFFICIENT AGAINST WHEEL
CLIMBING ON THE RAIL 71

INFORMATION AND COMMUNICATION TECHNOLOGIES AND MATHEMATICAL MODELLING

V. M. PAKHOMOVA, M. S. KONNOV
RESEARCH OF TWO APPROACHES TO DETECT
NETWORK ATTACKS USING NEURAL NETWORK
TECHNOLOGIES 81

MATERIAL SCIENCE

**I. O. VAKULENKO, D. M. BOLOTOVA,
S. V. PROIDAK, H. ASKEROV, H. CUG,
H. O. TCHAIKOVSKA**
FORMATION OF CARBON STEEL STRUCTURE
DURING HOT PLASTIC DEFORMATION 94

MECHANICAL ENGINEERING

P. M. HASHCHUK, S. V. NIKIPCHUK
THE EFFICIENCY OF WORKING CYCLES IN THE
RAPID INTERNAL COMBUSTION ENGINE WITH THE
EXTENDED WORKING STROKE 105

R. P. POGREBNIYAK, M. R. POHREBNIAK
SEARCH AND ELIMINATION OF REPEATED
CONNECTIONS IN THE SCHEME OF GUIDING SLIDE-
CRANK MECHANISM OF THE GRIPPING DEVICE..... 129

ROLLING STOCK AND TRAIN TRACTION

M. O. BULAKH
IMPROVING THE METHODOLOGY FOR ASSESSING
THE TRAIN TRAFFIC SAFETY
AT THE RAILWAY 138

S. V. VOYTKIV
ANALYSIS OF LAYOUT SCHEMES OF SLEEPING
CARS..... 147

V. V. LAGUTA, Y. H. KOZIK
DETERMINATION OF A RESTORATION PERIODS OF A
FRAME INSULATION OF TM ED-118A BY RECOVERY
VOLTAGE OBSERVATIONS 163

ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ СТАТЕЙ

До публікації в журналі приймаються статті українською, російською або англійською мовами проблемного, узагальнюючого, методичного характеру, оригінальні наукові, практичні дослідження, які раніше ніде не видавалися.

Матеріали необхідно надавати в друкованому та електронному вигляді у програмі Microsoft Word. Для набору формул використовується MathType.

Наукова стаття повинна відповідати вимогам п. 3 Постанови ВАК України № 7-05/1 від 15.01.2003 року.

Матеріали рецензуються членами редакційної колегії журналу та сторонніми незалежними експертами, виходячи з принципу об'єктивності та з позицій вищих міжнародних академічних стандартів якості, та редагуються. Редакція залишає за собою право на стилістичну правку рукопису.

Вимоги щодо обсягу наукових статей, повідомлень, відгуків та рецензій:

- оглядові та проблемні статті – до 45 000 знаків з пробілами (7–10 с.);
- загальні статті за рубриками видання – до 30 000 знаків з пробілами (5–7 с.);
- наукове повідомлення – до 8 000 знаків з пробілами (до 2,5 с.);
- відгук або рецензія – до 6 000 знаків з пробілами (до 2 с.).

Матеріал надається у форматі А4, враховуючи таблиці, ілюстрації, список використаних джерел. Статті, більші за обсягом, можуть бути прийняті до розгляду на підставі рішення редколегії.

Для здачі статті до друку авторам необхідно надати наступні документи:

1) файл зі статтею та друкований примірник рукопису з підписами всіх співавторів на останньому аркуші роботи;

2) оригінал Ліцензійного договору з підписами всіх співавторів;

3) файл з відомостями про кожного з авторів – прізвище, ім'я, по-батькові повністю, посада, місце роботи, наукове звання, науковий ступінь, контактна інформація (телефон, адреса електронної пошти), код ORCID. Відомості про авторів подаються трьома мовами – українською, російською та англійською;

4) Оригінал експертного висновку.

Увага! Згідно з міжнародними стандартами якості наукових публікацій необхідним є: наявність авторських розширених (250-300 слів) і структурованих резюме (рефератів – abstracts), у т.ч. англійською мовою, рецензій, пристатейних списків літератури в романському алфавіті тощо.

Виклад основного матеріалу статті повинен мати такі елементи:

- **вступ:** постановка проблеми, аналіз останніх досліджень;
- **мету;**
- **методику:** виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів. Докладно описують загальну методику дослідження, щоб його результати могли бути відтворені: описується послідовність виконання дослідження, обґрунтовується вибір використовуваних і викладається суть запропонованих методів і моделей, змістовно визначається, що саме досліджувалося кожним методом;
- **результати:** містять експериментальні чи теоретичні дані, отримані в роботі, для демонстрації того, що отримано нове рішення проблеми, і що робота є значним кроком вперед у порівнянні з попередніми дослідженнями. Дані подаються у формі таблиць, графіків, діаграм, рівнянь, фотографій, рисунків, статистичними оцінками. Результати повинні бути викладені коротко і чітко, при цьому містити досить інформації для оцінки зроблених висновків, також має бути очевидно, чому для аналізу обрані саме ці дані;
- **наукову новизну та практичну значимість.** Наукова новизна отриманих результатів викладається аргументовано, коротко і чітко. До наукової новизни не можна відносити прикладні результати (способи, пристрої, методики, схеми, алгоритми). Практичне значення отриманих результатів становлять відомості про використання результатів досліджень або рекомендації з їх використання;
- **висновки:** необхідно навести досягнуті кількісні та якісні показники дослідження, викласти рекомендації з їх використання.

З усіх питань звертайтеся до редакції журналу за адресою:

Науково-технічна бібліотека (ауд. 166),

Дніпровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна,

вул. Лазаряна, 2, м. Дніпро, Україна,

49010

e-mail: visnik@diit.edu.ua

Сайт журналу: <http://stp.diit.edu.ua/>

Наукове видання

**НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ.
ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА**

№ 3 (87) 2020

(українською, російською та англійською мовами)

Відповідальний за випуск – О. В. Помінова

Комп'ютерне верстання – О. В. Помінова

Літературна обробка – С. П. Лагдан

Формат 60×84¹/₈. Ум. друк. арк. 20,69. Тираж 100 пр. Зам. №02/03

**Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна**

Адреса редакції, видавця:

вул. Лазаряна, 2, кім. 267, м. Дніпро, 49010, Україна

Тел.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

Друк:

Видавництво «Герда», 49000, м. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 60

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серія ДК № 397 від 03.04.2001 р.



Научное издание

**НАУКА ТА ПРОГРЕС ТРАНСПОРТУ.
ВІСНИК ДНІПРОПЕТРОВСЬКОГО НАЦІОНАЛЬНОГО УНІВЕРСИТЕТУ
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ ІМЕНІ АКАДЕМІКА В. ЛАЗАРЯНА**

№ 3 (87) 2020

(на українском, русском и английском языках)

Ответственный за выпуск – О. В. Помінова

Компьютерная верстка – О. В. Помінова

Литературная обработка – С. П. Лагдан

Формат 60×84¹/₈. Ус. печат. лист. 20,69. Тираж 100 экз. Зак. №02/03

**Дніпровський національний університет залізничного транспорту
імені академіка В. Лазаряна**

Адрес редакції, видавця:

вул. Лазаряна, 2, ком. 267, г. Дніпро, 49010, Україна

Тел.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

Печать:

Издательство «Герда», 49000, г. Дніпро, пр. Д. Яворницького, 60

Свидетельство субъекта издательского дела серия ДК № 397 от 03.04.2001 г.



Scientific Edition

**NAUKA TA PROGRES TRANSPORTU.
VİSNIK DNİPROPETROVS'KOGO NACİONAL'NOGO UNİVERSİTETU
ZALİZNIČNOGO TRANSPORTU**

=

SCIENCE AND TRANSPORT PROGRESS

No. 3 (87) 2020

(in Ukrainian, Russian and English languages)

Responsible for issue – O. V. Pominova

Desktop publishing – O. V. Pominova

Redaction – S. P. Lahdan

Format 60×84¹/₈. Conventional printed sheet 20,69. Circulation 100. Order no. 02/03

Dnipro National University of Railway Transport named after Academician V. Lazaryan

Address of editor and editorial office

Lazaryan St., 2, r. 267, Dnipro, 49010, Ukraine

Tel.: +38 (056) 371-51-05

E-mail: lib@b.diit.edu.ua, visnik@diit.edu.ua

Printing

Publishing house «Gerda», 49000, Dnipro, Yavornitsky av., 60

